

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Identificación y desarrollo de controladores para
planta multiprocesos

Autor: Enrique Antonio Rodríguez González

Tutor: Daniel Limón Marruedo

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Identificación y desarrollo de controladores para planta multiprocesos

Autor:

Enrique Antonio Rodríguez González

Tutor:

Daniel Limón Marruedo

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Grado: Identificación y desarrollo de controladores para planta multiprocesos

Autor: Enrique Antonio Rodríguez González

Tutor: Daniel Limón Marruedo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por haberme apoyado a lo largo de estos años y haber hecho que todo haya sido mucho más fácil.

También a mis compañeros y amigos por haber estado a mi lado y hacer que todo haya sido mucho más ameno.

Por último, quiero agradecer también a mi tutor Daniel Limón Marruedo por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo este trabajo, haberme guiado y ayudado con las dudas y problemas que iban surgiendo, y en general haberme enseñado tanto.

*Enrique Antonio Rodríguez González
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Sevilla, 2019*

El trabajo realizado en este proyecto ha consistido en la identificación de los distintos elementos que se pueden encontrar en la planta multiprocesos del Laboratorio de Control del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática y el diseño y validación de estrategias de control avanzadas sobre la misma.

De esta manera, el presente documento se divide en tres partes principales y diferenciadas entre sí.

En primer lugar, se realizará una caracterización estática de distintas variables medibles de la planta que permitan tener una idea de la relación que existe entre las distintas variables de actuación de la planta con las variables que se pretenden controlar, lo cual será de gran utilidad a la hora de diseñar las estrategias de control.

A continuación, se realizará una identificación de la respuesta dinámica de las distintas variables medibles de la planta al actuar sobre la misma, para la elaboración de modelos matemáticos que se aproximen lo máximo posible a la planta real.

Por último, se probarán las distintas estrategias de control que se han pensado para la planta y se expondrán y compararán los resultados obtenidos tanto para las propuestas iniciales de control, como para las distintas mejoras que se hayan ido implementando, de manera que se pueda comprobar claramente la eficacia de dichas mejoras.

Abstract

The work that has been done for the following project has consisted in the identification of the different elements found in the multi-process plant that is located in the Control Laboratory of the Department of Systems Engineering and Automation, and the process of design and trial of different advanced control strategies for said plant.

Thus, the following document can be divided in three main parts that are differentiated from one another.

First, a static characterization of the different measurable variables that we can find in the plant will be made, which will help us have an idea of how the different process variables are related to the output of the different actuators. This will be of great help when designing control strategies.

Following that, an identification of the dynamic response will be made for the different measurable variables of the plant when each of the actuators are activated or changed, and the results will be used for obtaining mathematical models of the plant.

Lastly, different controllers will be tried on the plant and the results obtained will be shown, not only for the original control structures, but also for the different improvements and changes that were implemented in these controllers, with the goal of showing how these improvements made the overall controlling process more efficient or robust.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxii
1 Introducción	23
1.1. <i>Motivación y objetivos</i>	23
1.2. <i>Descripción de la planta</i>	23
1.3. <i>Estructura del trabajo</i>	26
2 Funcionamiento de las configuraciones 1 y 2 de la planta multiprocesos	27
2.1. <i>Configuración 1: control de nivel del contenedor de agua</i>	27
2.2. <i>Configuración 2: control de temperaturas de la planta multiprocesos</i>	28
3 Identificación estática de la planta multiprocesos	31
3.1. <i>Identificación estática de la configuración 1 de la planta</i>	31
3.1.1. <i>Característica estática del caudal FT medido frente a VR1</i>	31
3.1.2. <i>Ensayo de escalón y modelo de primer orden del caudal FT frente a la válvula VR1</i>	34
3.1.3. <i>Caracterización de la válvula VA1 de descarga del tanque de agua: caudal máximo sin desbordamiento para distintos valores de la válvula VA1</i>	35
3.2. <i>Identificación estática de la configuración 2 de la planta</i>	37
3.2.1. <i>Ensayos de escalón para las variables de actuación de la configuración 2</i>	37
3.2.2. <i>Ensayos para caracterización de uno de los intercambiadores de calor de la planta</i>	44
4 Identificación del comportamiento dinámico de la planta multiprocesos en la configuración 2	64
4.1. <i>Respuesta frecuencial de la planta frente a las resistencias R1 y R2</i>	65
4.2. <i>Respuesta frecuencial del sistema frente a las válvulas VR2 y VR3 de los intercambiadores de calor</i>	69
4.3. <i>Respuesta frecuencial de la planta frente a la válvula VR1</i>	74
5 Implementación de controladores para la configuración 1 de la planta	80
5.1. <i>Diseño del controlador PID simple del nivel LT mediante VR1</i>	81
5.2. <i>Diseño del controlador en cascada del nivel LT</i>	83
5.3. <i>Ensayo y comparación de resultados del controlador PID simple y el controlador en cascada</i>	85
6 Implementación de controladores para la configuración 2 de la planta	89
6.1. <i>Control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3, TT2 mediante R1 y R2 y nivel LT mediante VR1</i>	91
6.1.1. <i>Controlador PID simple de la temperatura TT2 mediante las resistencias R1 y R2</i>	92
6.1.2. <i>Control predictivo de TT9 mediante VR2 y VR3 mediante predictor de Smith</i>	93

6.1.3. Ensayo del control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3, TT2 mediante las resistencias R1 y R2, y nivel LT mediante la válvula VR1.	99
6.2. Control selectivo de TT2 mediante R1 y R2 y VR1, con control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3	101
6.2.1. Diseño del controlador de TT2 mediante VR1 e implementación del control selectivo	101
6.2.2. Ensayo del control selectivo de TT2 mediante R1, R2 y VR1, con control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3	102
7 Conclusiones y mejoras propuestas	105
7.1. Conclusiones	105
7.2. Mejoras propuestas	105
8 Referencias	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=33%.	59
Tabla 3.2 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=66%.	60
Tabla 3.3 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=100%.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. – Esquema general de la planta multiprocesos.	24
Figura 1.2 – Esquema del sistema de control de la planta.	25
Figura 2.1 – Esquema de funcionamiento de la configuración 1 de la planta multiprocesos.	27
Figura 2.2 – Esquema de funcionamiento de la configuración 2 de la planta multiprocesos.	29
Figura 3.1 – Modelo de Matlab-Simulink del ensayo para la característica estática de caudal FT frente a VR1.	32
Figura 3.2. Submodelo de Matlab-Simulink para asignación de entradas para enviar al servidor OPC.	32
Figura 3.3 – Resultados del ensayo para la característica estática de caudal FT frente a VR1.	33
Figura 3.4 – Característica estática de caudal FT frente a VR1	33
Figura 3.5 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de caudal FT frente a VR1.	34
Figura 3.6 – Ensayo para caracterización de la válvula VA1 frente al caudal máximo que evita el desbordamiento del tanque.	35
Figura 3.7 – Ensayo de caracterización de VA1 frente a caudal máximo filtrado.	36
Figura 3.8 – Característica estática de VA1 frente a caudal máximo que evita desbordamiento del tanque.	36
Figura 3.9 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR1 frente a TT2.	38
Figura 3.10 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR1 frente a TT9.	39
Figura 3.11 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR2 frente a TT9.	40
Figura 3.12 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR3 frente a TT9.	41
Figura 3.13 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de R1/R2 frente a TT2.	43
Figura 3.14 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de R1/R2 frente a TT9.	43
Figura 3.15 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=33%.	45
Figura 3.16 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=33%.	45
Figura 3.17 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=33%.	46
Figura 3.18 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=33%.	46
Figura 3.19 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=33%.	47
Figura 3.20 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=33%.	47

Figura 3.21 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=33%.	48
Figura 3.22 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=33%.	48
Figura 3.23 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=33%.	49
Figura 3.24 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=66%.	49
Figura 3.25 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=66%.	50
Figura 3.26 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=66%.	50
Figura 3.27 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=66%.	51
Figura 3.28 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=66%.	51
Figura 3.29 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=66%.	52
Figura 3.30 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=66%.	52
Figura 3.31 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=66%.	53
Figura 3.32 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=66%.	53
Figura 3.33 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=100%.	54
Figura 3.34 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=100%.	54
Figura 3.35 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=100%.	55
Figura 3.36 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=100%.	55
Figura 3.37 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=100%.	56
Figura 3.38 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=100%.	56
Figura 3.39 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=100%.	57

Figura 3.40 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=100%.	57
Figura 3.41 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=26 °C y VR1=100%.	58
Figura 3.42 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=33%.	61
Figura 3.43 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=66%.	61
Figura 3.44 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=100%.	62
Figura 3.45 – Efecto de las oscilaciones de la temperatura TT5 en TT3.	63
Figura 4.1 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en R1/R2.	65
Figura 4.2 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en R1/R2.	66
Figura 4.3 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a R1/R2.	67
Figura 4.4 – Respuesta frecuencial de TT2 ante ensayo chirp en R1/R2.	68
Figura 4.5 – Respuesta frecuencial procesada de TT2 ante ensayo chirp en R1/R2.	68
Figura 4.6 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT2 frente a R1/R2.	69
Figura 4.7 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR2.	70
Figura 4.8 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR2.	71
Figura 4.9 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR2.	72
Figura 4.10 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR3.	72
Figura 4.11 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR3.	73
Figura 4.12 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR3.	74
Figura 4.13 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR1.	75
Figura 4.14 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR1.	75
Figura 4.15 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR1.	76
Figura 4.16 – Respuesta frecuencial de TT2 ante ensayo chirp en VR1.	77
Figura 4.17 – Respuesta frecuencial procesada de TT2 ante ensayo chirp en VR1.	77
Figura 4.18 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT2 frente a VR1.	78
Figura 5.1 – Esquema de la estructura de un controlador en cascada.	81
Figura 5.2 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de nivel PID simple con parámetros iniciales.	82
Figura 5.3 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de nivel PID simple con parámetros ajustados.	83
Figura 5.4 – Ensayo 1 del controlador de nivel PID simple.	86
Figura 5.5 – Ensayo 2 del controlador de nivel PID simple.	86
Figura 5.5 – Ensayo 1 del control en cascada de nivel del tanque.	87
Figura 5.6 – Ensayo 2 del control en cascada de nivel del tanque.	87
Figura 6.1 - Diagrama de bloques del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.	90
Figura 6.2 – Diagrama de bloques del control selectivo de TT2 y LT.	90
Figura 6.3 – Posición de los sensores de las temperaturas a controlar.	91
Figura 6.4 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador PID de TT2 mediante R1 y R2.	92

Figura 6.5 – Esquema de la estructura de un control predictivo mediante predictor de Smith.	93
Figura 6.6 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de TT9 frente a VR3, con VR2 saturada.	95
Figura 6.7 – Efecto de las oscilaciones de la temperatura TT5 en TT4.	96
Figura 6.8 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 sin predictor.	97
Figura 6.9 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 con predictor de Smith.	97
Figura 6.10 – Esquema de la estructura de un controlador con predictor de Smith filtrado.	98
Figura 6.11 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 con predictor de Smith filtrado.	99
Figura 6.12 – Respuesta de TT9 en el ensayo general del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.	100
Figura 6.13 – Respuesta de TT2 y LT en el ensayo general del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.	100
Figura 6.14 – Respuesta de TT9 en el ensayo general del control selectivo de TT2 y TT9.	103
Figura 6.15 – Respuesta de TT2 y LT en el ensayo general del control selectivo de TT2 y TT9.	103

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si
OPC	OLE for Process Control
OLE	Object Linking and Embedding
PLC	Programmable Logic Controller
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

1 INTRODUCCIÓN

A continuación, se expondrán los objetivos que se han pretendido conseguir con este Trabajo de Fin de Grado, así como una introducción al proyecto en la que principalmente se describirá la planta sobre la que se va a trabajar.

1.1. Motivación y objetivos

La principal motivación para la realización de este Trabajo de Fin de Grado es el interés por obtener modelos precisos del funcionamiento de la planta en todas sus configuraciones, que puedan servir para desarrollar técnicas de control más avanzadas que puedan ser probadas posteriormente en la planta real.

Por otro lado, también existe un interés en probar técnicas de control ya establecidas sobre una planta real que posee una cierta complejidad debido a retrasos en la actuación y variables de actuación que están acopladas entre sí.

Para ello, a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se van a llevar a cabo distintas tareas de identificación del comportamiento de la planta multiprocesos, tanto en lo que respecta a la caracterización estática de las distintas variables medibles en la planta como la respuesta frecuencial de las mismas ante la actuación sobre las numerosas entradas de las que se dispone.

Una vez realizadas dichas tareas de identificación, se llevará a cabo un diseño e implementación de distintas estrategias de control que se han pensado para dos de las tres configuraciones con las que es posible trabajar en la planta. Las estructuras de estos controladores, así como el diseño de los mismos, se establecerán en base a los resultados obtenidos durante la identificación previa de la planta, de manera que dichas estrategias de control sirvan para dar solución a los problemas que se pueden encontrar a la hora de controlar la planta que se han comentado antes.

1.2. Descripción de la planta

La planta multiprocesos está situada en Laboratorio de Control, dentro del edificio de laboratorios del Departamento de Automática. Su diseño y montaje fue realizado por distintos componentes del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. Por otra parte, la programación de la planta y la implementación de su comunicación fue realizada por José Enrique Alonso durante su Trabajo de Fin de Grado en 2013, y posteriormente sería rediseñada y mejorada por José Luis Pozo en su propio Trabajo de Fin de Grado en 2015.

La planta está destinada al estudio y aprendizaje de técnicas de control sobre un sistema real, en el cual se dispone de numerosas variables de actuación que permitirán controlar distintas medidas que se pueden obtener mediante numerosos sensores de los que se dispone en la planta, como pueden ser distintos sensores de temperatura, nivel de agua, caudal o presión.

A continuación, se presenta un esquema que refleja los distintos elementos que componen la planta [1], [2], tanto actuadores como sensores:

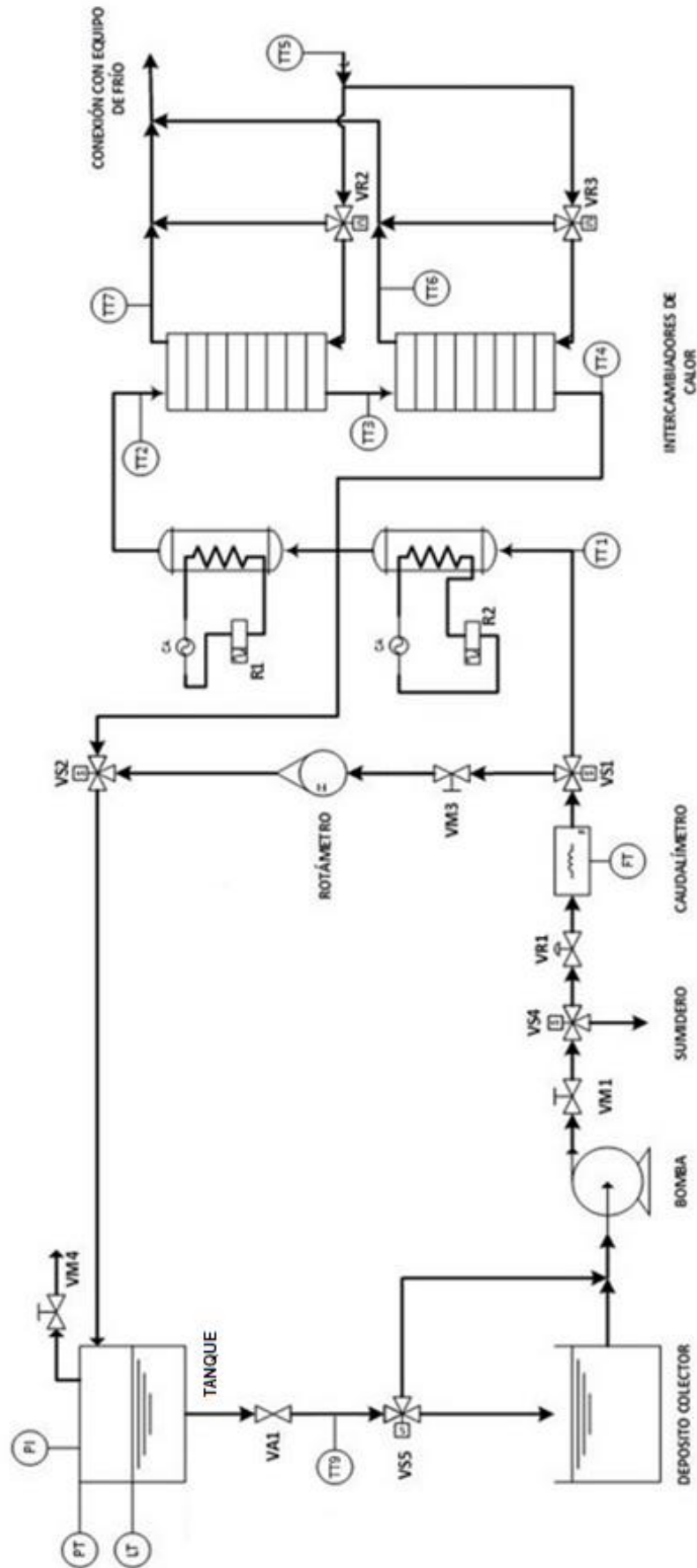


Figura 1.1. – Esquema general de la planta multiprocesos.

Con este esquema en mente, ya se puede describir el principio de funcionamiento de la planta:

Se dispone de un depósito colector de agua, que se puede llenar y vaciar de agua, y que será el punto de inicio y de retorno del proceso que ocurre en la planta.

El depósito colector está conectado a una bomba, que permite impulsar el agua de dentro del depósito al resto del circuito de la planta. La válvula manual VM1 permite cerrar o abrir la salida de la bomba. Además, mediante la válvula VS4, se puede elegir llevar el agua hasta un sumidero, que servirá para descargar el depósito colector, o que el agua siga por el camino habitual del proceso.

En el funcionamiento normal de la planta, el caudal de agua que impulsa la bomba viene definido por la apertura de la válvula VR1. Este caudal se medirá mediante el caudalímetro magnético (FT) colocado justo delante de la válvula VR1.

Desde aquí, y dependiendo de la configuración, el agua se podrá dirigir a un camino u otro mediante la válvula VM3:

- 1) En el caso de la configuración 1, se dirigirá toda el agua a través del rotámetro FI, de manera que atraviese el rotámetro, que permite obtener otra medida del caudal de agua, para dirigirse directamente al tanque de agua, en el que se podrán obtener medidas de presión y/o nivel mediante los correspondientes sensores PT y LT. Es necesario comentar que el sensor de nivel de la planta es algo limitado, ya que cuenta con numerosos problemas de ruido y tiene una zona muerta desde los 0 cm hasta, aproximadamente, los 5.5 cm.
- 2) Para la configuración 2, el agua circulará por el camino alternativo, atravesando las resistencias R1 y R2 (R2 de 4 kW y R2 de 2 kW) y por dos intercambiadores de calor. Estos intercambiadores de calor permitirán que el agua que proviene del depósito transfiera calor a otro caudal de agua más fría, que viene desde una planta de refrigeración colocada en la parte superior del edificio. Dicho caudal de agua fría se podrá controlar mediante las válvulas de regulación VR2 y VR3, que dirigirán el agua bien al correspondiente intercambiador de calor, o bien de vuelta hacia la planta de refrigeración. Tras atravesar ambos intercambiadores de calor, el caudal de agua proveniente del depósito se dirigirá al tanque de agua, igual que ocurría en la configuración 1.

Una vez en el tanque de agua, el agua irá abandonando el mismo y dirigiéndose de nuevo al depósito a una velocidad marcada por la válvula VA1, que actúa como un regulador del coeficiente de descarga del depósito.

La temperatura del caudal de agua que proviene del depósito se podrá medir a lo largo del circuito en varios sensores de temperatura (TT1-TT4 y TT9), uno de los cuales es fijo (TT4), mientras que el resto de tomas (TT1, TT2, TT3 y TT9) son intercambiables y disponen de tres sondas que se pueden acoplar y desacoplar, según las temperaturas que sean de interés medir en cada momento. Esto es especialmente interesante ya que, actuando sobre las distintas variables de las que depende la temperatura del caudal de agua, se podrá controlar la temperatura de la misma en distintos puntos del circuito, en los cuales la dependencia con dichos actuadores podrá ser distinta o existir un retraso mayor o menor con respecto a las correspondientes señales de actuación.

La estructura de control de la planta está organizada de la siguiente manera:

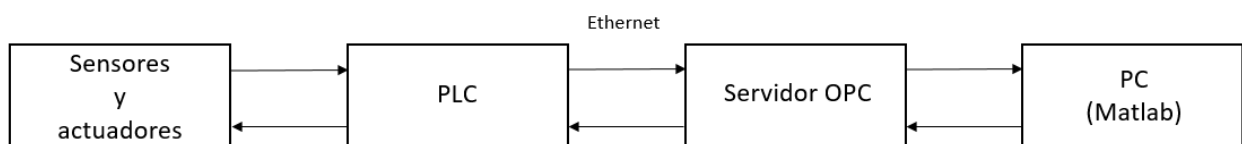


Figura 1.2 – Esquema del sistema de control de la planta.

- En primer lugar, los sensores y actuadores de la planta están conectados al PLC del que se dispone, donde se escalan los datos que se reciben de los sensores y los que se van a enviar a cada uno de los actuadores, según corresponda.
- Por otro lado, se ha configurado un servidor OPC mediante el cual, por Ethernet, se comunican el PC sobre el que se ha trabajado y el PLC. De esta forma, el PLC podrá enviar al PC las lecturas ya escaladas que se hayan obtenido de cada uno de los sensores, y desde el PC se podrán enviar las señales que se asignen a cada uno de los actuadores. La configuración del PLC para que éste envíe y reciba información del servidor OPC ya fue realizada anteriormente por José Luis Pozo y José Enrique Alonso en sus respectivos Trabajos de Fin de Grado [3], [4], por lo que sólo ha sido necesario configurar el servidor OPC para que éste funcione sobre Ethernet.
- Por último, en el PC se llevará a cabo el control de la planta mediante modelos programados en Matlab-Simulink, que permitirán asignar los valores que se quiera a los actuadores de la planta en cada momento, a la vez que se registran los valores medidos en los sensores que se reciben del PLC mediante el servidor OPC.

De esta manera, todo el trabajo se ha podido realizar mediante Matlab-Simulink, desde las distintas tareas de identificación de la planta hasta la implementación de las diferentes estrategias de control propuestas.

1.3. Estructura del trabajo

El presente trabajo de fin de grado está estructurado en tres partes principales según el trabajo realizado:

- Una primera parte en la que se realizará una caracterización estática de la planta, de manera que se puedan establecer las dependencias entre los distintos actuadores de la planta y las magnitudes medidas, en cuyos resultados estarán basados posteriormente las distintas estrategias de control que se pretenden probar en la planta multiprocesos.
- Una segunda parte en la cual se realizará una identificación del comportamiento dinámico de la planta para la configuración 2, principalmente mediante ensayos con señales chirp en los actuadores, y cuyos resultados serán utilizados para obtener modelos aproximados del comportamiento de distintos componentes de la planta.
- Por último, una tercera parte en la que se establecerán las estrategias de control que se han elegido para probar en la planta multiprocesos, que se someterán a ensayos específicos y, en base a los resultados, se mejorarán dichas estrategias de control en la medida de lo posible.

No obstante, antes de empezar con la primera de estas partes, se va a explicar de manera breve el funcionamiento de las dos configuraciones de la planta con las que se va a trabajar: la configuración “1”, de control de nivel o presión del contenedor de agua (en este caso, se ha excluido la parte de presión del sistema) y la configuración “2”, en la que se controlan distintas temperaturas del circuito que recorre el agua, devolviendo siempre el agua hasta el depósito colector.

Existe también una tercera configuración de la planta, en la cual se realimenta el agua a la salida del contenedor en lugar de devolverla al depósito colector, de manera que se está realimentando continuamente el mismo volumen de agua al circuito. Sin embargo, se ha decidido no realizar el estudio de esta configuración en este Trabajo de Fin de Grado, que se centra en el estudio de las otras dos configuraciones.

2 FUNCIONAMIENTO DE LAS CONFIGURACIONES 1 Y 2 DE LA PLANTA MULTIPROCESOS

Como bien se ha mencionado antes, previo al estudio del comportamiento estático de la planta multiprocesos, se va a realizar una descripción del funcionamiento de las dos configuraciones de la planta que son de estudio en este trabajo.

En estas descripciones se hará mención a las distintas variables de actuación de las que se dispone en cada una de las configuraciones, así como las variables a controlar y otras variables intermedias que son medidas en la planta. Una vez descritas todas estas variables, se establecerán las distintas estrategias de control que se creen de interés para su implementación y estudio en la tercera parte del trabajo.

2.1. Configuración 1: control de nivel del contenedor de agua

Como ya se ha comentado, en la configuración de la planta multiprocesos el agua circula exclusivamente a través del rotámetro, sin entrar en la parte de control de temperatura de la planta, donde se encuentran las resistencias y los intercambiadores de calor. Por tanto, en esta configuración, las únicas variables a controlar serán el nivel o la presión del tanque (que, como se ha mencionado, se va a obviar para centrarse en la identificación y control del nivel del tanque en este trabajo) y el caudal de agua impulsado a través de la planta.

El esquema de funcionamiento de la planta en la configuración 1 es el siguiente:

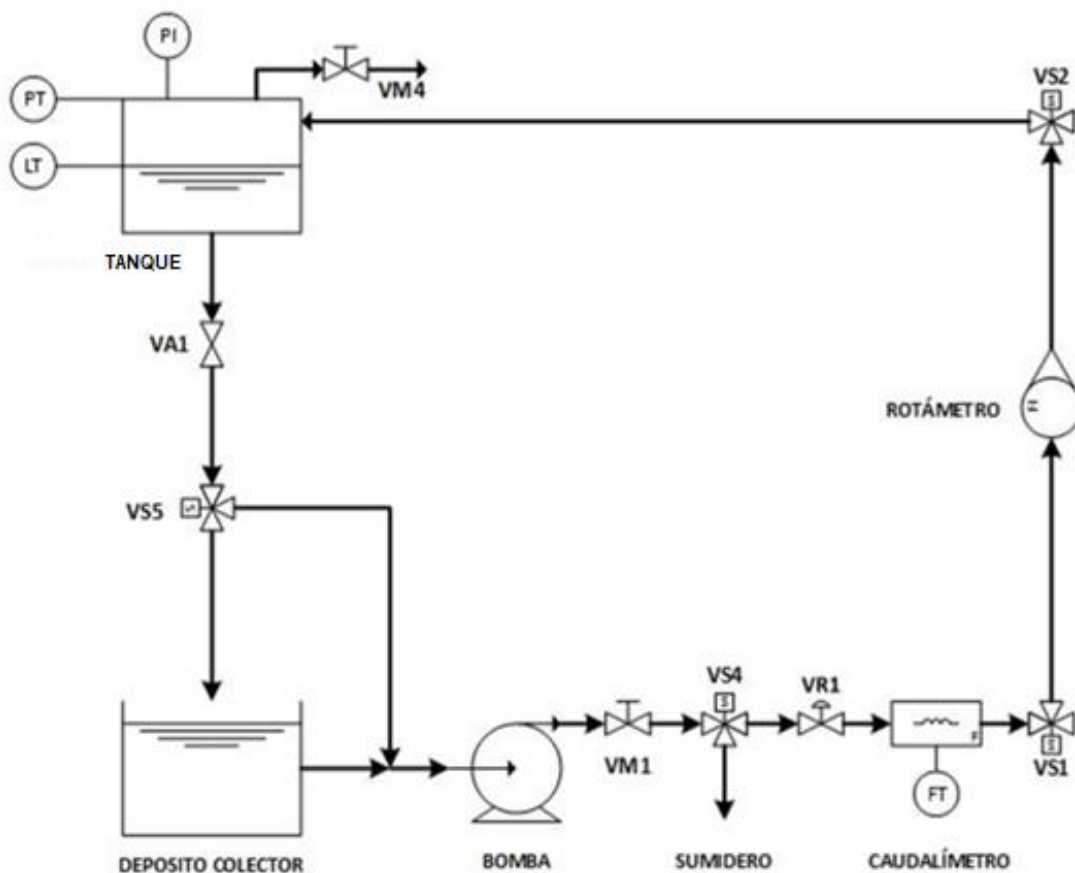


Figura 2.1 – Esquema de funcionamiento de la configuración 1 de la planta multiprocesos.

Se puede observar a simple vista que sólo se dispone de una variable de actuación en esta configuración: la apertura de la válvula VR1, que fijará el valor del caudal de agua impulsado a través de la planta. Las válvulas VS1, VS2 y VS5 son fijas y vienen configuradas en el programa del autómatas, y la variable VS4, que sí que es posible modificar manualmente, sólo permite vaciar el depósito colector, lo cual no es de utilidad a la hora de controlar el nivel del contenedor.

Por otro lado, también se dispone de la válvula VA1, que regula la velocidad a la que se desaloja agua del contenedor hacia el depósito colector, pero nuevamente es una válvula manual cuya apertura no se puede modificar mediante un controlador. No obstante, sí que será posible utilizar esta válvula como una perturbación puntual a la hora de comprobar la respuesta de la estructura de control propuesta ante perturbaciones.

Además, se dispone también de un caudalímetro magnético, FT, que permitirá medir el caudal de agua que lo atraviesa, y que dependerá directamente de la apertura de la válvula VR1.

En base a esto, y a que la simplicidad de esta configuración no da pie a muchas opciones más, se ha pensado una única estrategia de control que implementar y probar: se propone implementar un controlador en cascada que controle el nivel del tanque mediante la apertura de la válvula VR1, con el caudal FT medido como variable intermedia.

La ventaja que aporta el uso de un controlador en cascada en este caso con respecto a de un controlador PID simple que controle el nivel LT mediante VR1, será el poder responder con más rapidez a variaciones en el caudal FT medido que sean ajenas a la apertura de la válvula VR1 (como, por ejemplo, cerrar ligeramente la válvula VM1 de la bomba, la válvula VM3 que redirige agua hacia la parte de control de temperatura de la planta o la válvula de presión en el tanque).

Por tanto, y para poder comprobar las ventajas establecidas para el control en cascada, se diseñará también dicho controlador PID simple y se realizarán los mismos ensayos a ambas estrategias de control con el objetivo de poder comparar los resultados.

2.2. Configuración 2: control de temperaturas de la planta multiprocesos

A diferencia de la configuración 1, la configuración 2 goza de una mayor complejidad y, por tanto, de un mayor número de variables a controlar y de actuación. De esta manera, la variedad de posibles estrategias de control a implementar para esta configuración va a ser mucho mayor que para la configuración anterior.

En esta configuración, el agua del depósito colector será impulsada a través de las dos resistencias de la planta, R1 y R2, y a través de los dos intercambiadores de calor de los que se dispone, para finalmente dirigir el agua hasta el contenedor de agua, como ya se hacía en la configuración 1.

Tanto las resistencias R1 y R2 como los intercambiadores podrán ser controlados: en el caso de R1 y R2, se trabajará con el duty cycle de las resistencias. Por su parte, los intercambiadores de calor serán controlados mediante VR2 y VR3 que definirán la cantidad de agua proveniente de la planta de frío que se introduce en cada uno de los intercambiadores de calor (VR2 para el primer intercambiador de calor, y VR3 para el segundo, en el orden en que el agua recorre la planta).

El esquema de funcionamiento de la configuración 2 se expone a continuación:

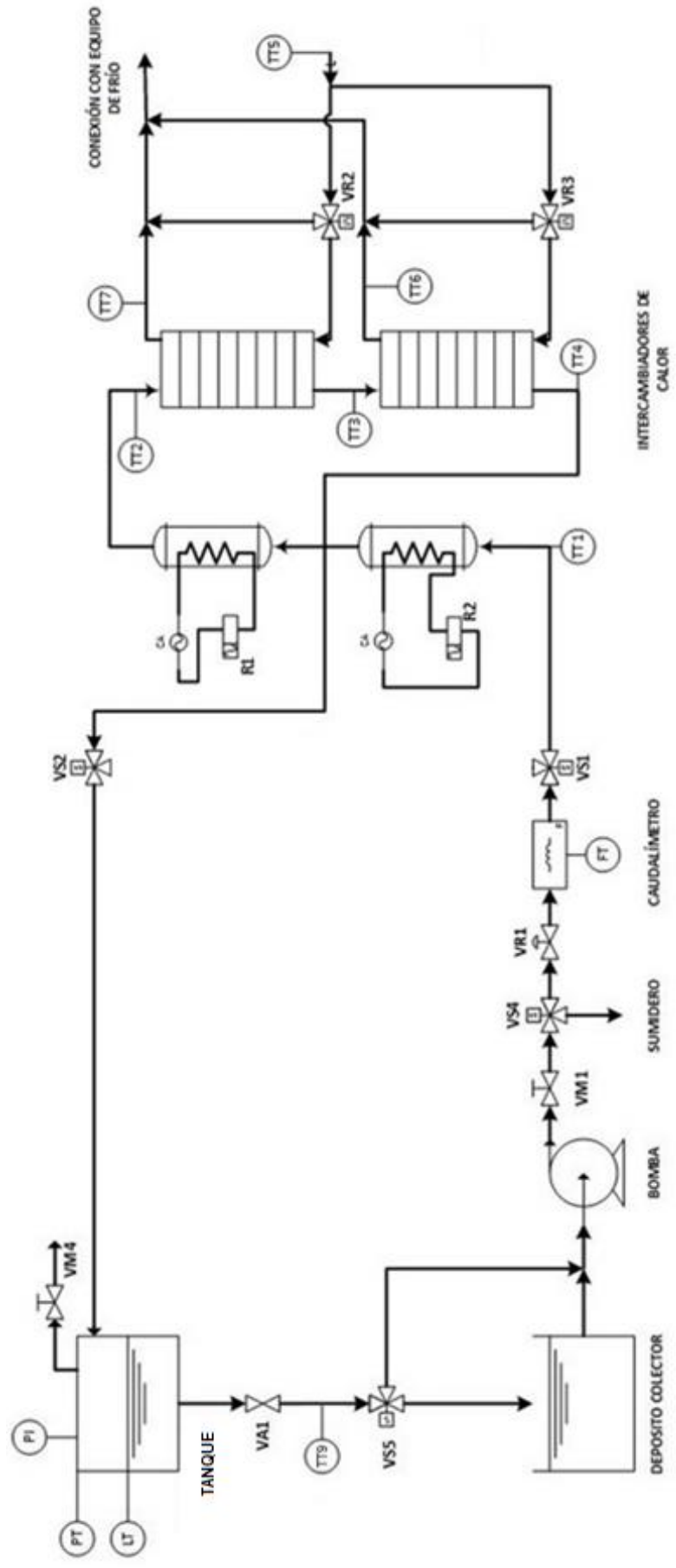


Figura 2.2 – Esquema de funcionamiento de la configuración 2 de la planta multiprocesos.

Como se puede observar, a lo largo del recorrido del agua a través de la planta en esta configuración existen numerosos sensores de temperatura, desde TT1 hasta TT4 y también TT9. Las temperaturas medidas por estos sensores van a ser las principales variables a controlar de esta configuración (además del nivel del tanque, como en la configuración anterior). Se exponen a continuación las temperaturas que se corresponden con cada uno de estos sensores:

- TT1: temperatura de entrada al circuito de control de temperatura, previo a la resistencia R2.
- TT2: temperatura medida a la salida de la segunda resistencia.
- TT3 y TT4: temperaturas de salida de cada intercambiador de calor (TT3 para el primer intercambiador y TT4 para el segundo) del agua proveniente del depósito colector.
- TT5: temperatura del **agua proveniente de la planta de frío** que se introduce en los intercambiadores de calor.
- TT6 y TT7: temperaturas de salida de los intercambiadores de calor (TT7 para el primer intercambiador de calor y TT6 para el segundo) **del agua proveniente de la planta de frío**.
- TT8: actualmente desconectada de la planta.
- TT9: temperatura de salida del agua del tanque. Teniendo en cuenta que entre TT4 y TT9 no hay ningún elemento que actúe de forma activa sobre la temperatura del agua, salvo las pérdidas que haya durante su transporte, la medida de TT9 será similar a la de TT4, pero con cierto retraso.

Para modificar la temperatura del agua impulsada a través de la planta existen claramente distintos actuadores:

- R1 y R2 permiten calentar el agua. Aunque se pueden controlar sus duty cycle por separado, se ha decidido hacer que ambos duty cycle sean iguales para la identificación de las resistencias y también a la hora de controlar las temperaturas con éstas.
- VR2 y VR3 permiten enfriar el agua, siempre que su temperatura sea suficientemente superior a la del agua que proviene de la planta de frío (ya que, si son prácticamente iguales, casi no habrá transferencia de calor de una a otra).
- El caudal de agua impulsada, marcado por la apertura de la válvula VR1, también afectará a la temperatura del agua. Por lo general, a mayor caudal de agua impulsado, menor será la temperatura del agua medida a lo largo de la planta.

Visto esto, se han ideado dos estrategias de control distintas que implementar y probar para la planta en esta configuración. Las estructuras de control que se han pensado para esta configuración son las siguientes:

- 1) La primera estructura de control ha consistido en un control descentralizado de TT2 mediante las resistencias R1 y R2, a la vez que se realiza un control predictivo (mediante predictor de Smith) de TT9 con VR2 y VR3 y se controla el nivel del contenedor de agua LT mediante VR1.
- 2) La segunda estrategia consistirá en un control selectivo mediante el cual se controle la temperatura TT2 mediante R1 y R2, igual que en el caso anterior, pero también mediante la variable VR1, a la vez que se sigue controlando TT9 mediante las válvulas VR2 y VR3, con el mismo control predictivo.

En este caso, no existirá una referencia de nivel que seguir, como ocurría en la estrategia de control anterior. No obstante, al hacer uso de VR1 para controlar la temperatura TT2, puede darse el caso de que el nivel del tanque se eleve demasiado y llegue a desbordar. Para ello se idea este control selectivo: en el momento en que se detecte que el nivel del agua sobrepasa un límite marcado, próximo al desborde, se limitará la acción de VR1 a aquella que mantenga constante el nivel en dicho límite, hasta que la acción del controlador de TT2 mediante VR1 sea menor.

Estas dos estructuras de control serán sometidas a ensayos en los cuales se podrá comprobar su funcionamiento en un entorno en el que las variables de actuación están acopladas entre sí y en el que existen retrasos de magnitud importante en la actuación (de ahí que se haya elegido TT9 como variable a controlar en lugar de TT4).

Una vez descritas las dos configuraciones de la planta con las que se va a trabajar, se puede pasar a la primera parte del trabajo, la “identificación estática” de la planta.

3 IDENTIFICACIÓN ESTÁTICA DE LA PLANTA MULTIPROCESOS

La identificación estática de la planta se ha realizado por separado para cada una de las configuraciones de la planta que son objeto de estudio. En cada uno de los apartados correspondientes a cada configuración, se exponen los ensayos propuestos y los resultados que se han obtenido de dichos ensayos, así como las conclusiones que se derivan de estos.

Así, se procede ahora a la identificación estática de la configuración 1 de la planta multiprocesos.

3.1. Identificación estática de la configuración 1 de la planta

Para la identificación estática de la planta funcionando en la configuración 1 se han llevado a cabo distintos ensayos que nos permiten observar y comprender el funcionamiento de la planta en distintas condiciones de operación, así como la obtención de modelos de primer orden que se asemejan a los modelos reales de la planta.

En concreto, los ensayos realizados han sido los siguientes:

- 1) Ensayo de barrido de VR1 a lo largo de su rango de operación (de 0 a 100% de apertura de la válvula), con el objetivo de obtener una característica estática que relacione la variable VR1 con el caudal FT medido en el caudalímetro magnético colocado justo a continuación de la válvula.

Si bien también sería posible realizar una característica estática que relacione VR1 con el nivel LT medido en el contenedor de agua, el rango de VR1 en el que el nivel se mantiene constante y mayor que 0 (sin que el agua desborde) es bastante limitado y, por tanto, el ensayo no es de gran utilidad a la hora de diseñar un controlador para el nivel.

- 2) Ensayo de escalón y modelo de primer orden del caudal FT frente a la apertura de la válvula VR1. Este modelo de primer orden será una aproximación a la relación real que existe entre VR1 y el caudal FT, y los parámetros de dicho modelo, en especial la ganancia, podrán ser utilizados posteriormente en el diseño del controlador en cascada.
- 3) Ensayo para cálculo de caudal máximo sin desbordamiento, haciendo barrido a lo largo del rango de operación de la válvula VA1 de descarga del contenedor de agua, con el objetivo con conseguir determinar la característica instalada de la válvula de descarga.

3.1.1 Característica estática del caudal FT medido frente a VR1

Para la obtención de la característica estática de FT frente a VR1 mediante el ensayo descrito en el apartado anterior, se ha diseñado un modelo en Matlab-Simulink bastante simple, que permite variar el valor de VR1 durante la realización del ensayo y guardar los distintos resultados obtenidos en una variable llamada "lecturas".

El modelo utilizado ha sido el siguiente:

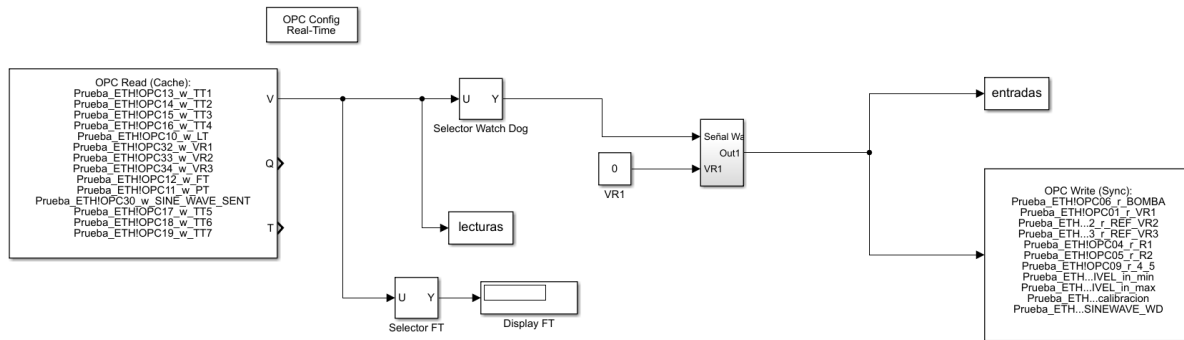


Figura 3.1 – Modelo de Matlab-Simulink del ensayo para la característica estática de caudal FT frente a VR1.

El subsistema que aparece en el modelo es simplemente un multiplexor en el que se fijan las entradas de la planta: el valor de VR1, la señal de watch dog que utiliza la planta para comprobar que la comunicación se sigue realizando, y otras entradas de la planta (la señal de activación de la bomba, los duty cycle de las resistencias, las referencias de VR2 y VR3 y algunas variables relacionadas con la calibración del sensor de nivel) que no se utilizan en este ensayo y que se ponen a 0.

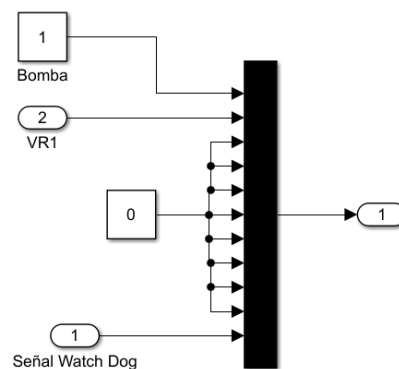


Figura 3.2. Submodelo de Matlab-Simulink para asignación de entradas para enviar al servidor OPC.

Este modelo va a ser la base de todos los otros modelos que se van a utilizar para la realización de ensayos y la implementación de controladores: el módulo de configuración y de lectura y escrituras de datos para el servidor OPC, las variables “lecturas” y “entradas” donde se guardan los datos que se leen y se escriben en dicho servidor y, dependiendo de cada caso, los demás componentes que puedan formar parte de cada ensayo y/o estructura de control.

El ensayo realizado para obtener la característica estática es muy sencillo: empezando con VR1=0, se va aumentando este valor de 10 en 10 una vez que se comprueba que el valor de FT se ha estabilizado, hasta que se llega a VR1=100 y el ensayo termina.

Los resultados obtenidos para el ensayo han sido los siguientes:

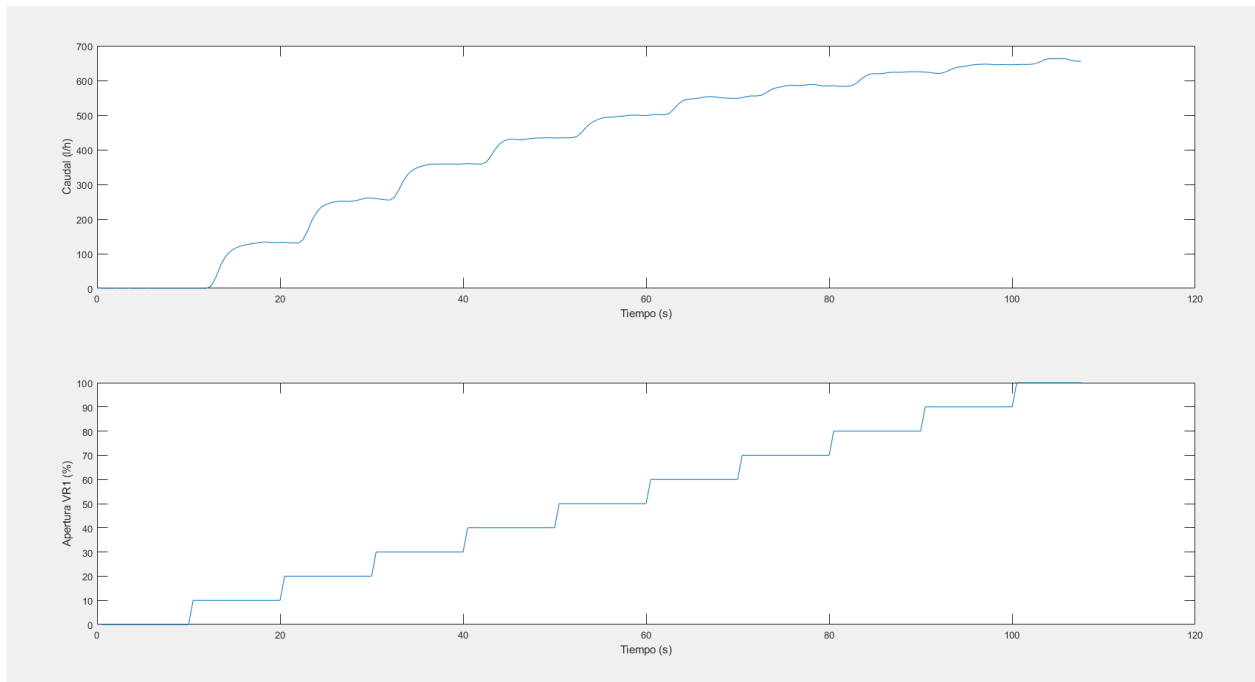


Figura 3.3 – Resultados del ensayo para la característica estática de caudal FT frente a VR1.

Como se puede comprobar, el caudal FT varía cada vez menos para variaciones iguales en VR1 conforme éste aumenta, es decir, la ganancia del sistema es menor conforme mayor es el caudal y/o la apertura de la válvula VR1.

Estos resultados obtenidos, colocados de forma que el caudal medido quede enfrentado a la apertura de la válvula VR1, dan lugar a la característica estática que se iba buscando:

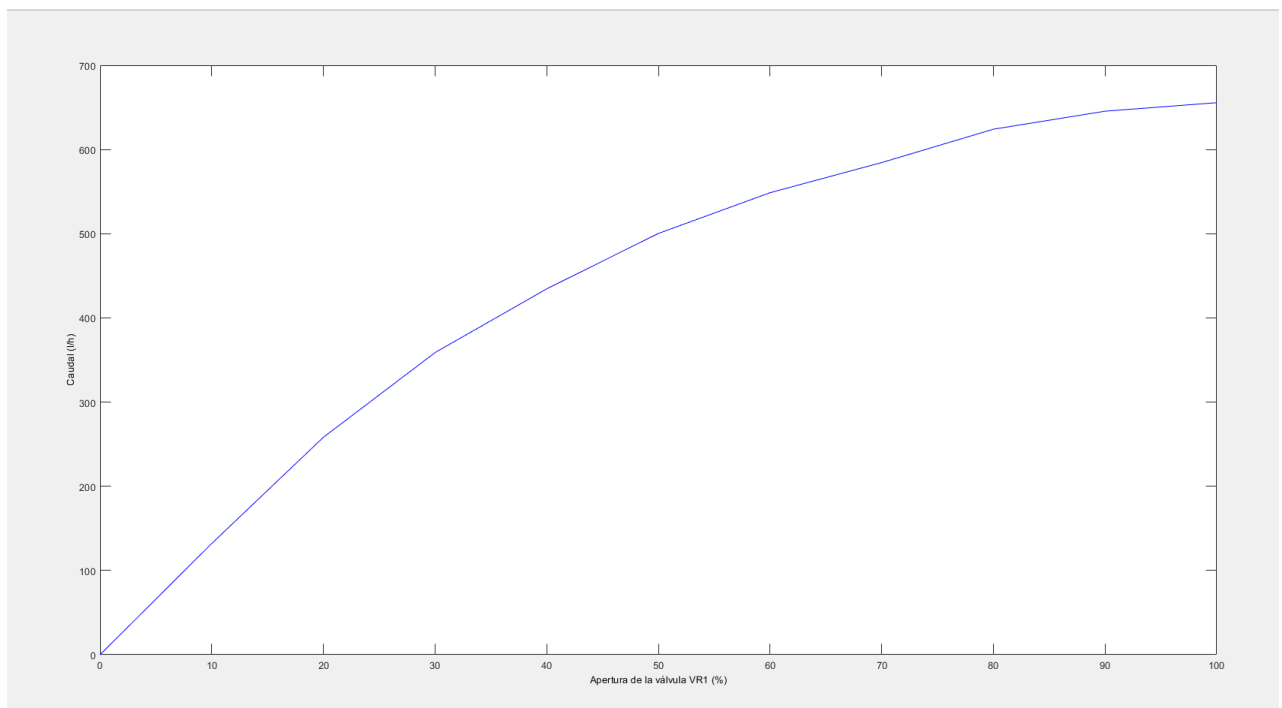


Figura 3.4 – Característica estática de caudal FT frente a VR1

Efectivamente, como ya se podía deducir, la pendiente de la curva es bastante más pronunciada para valores bajos del caudal mientras que, para valores altos, el caudal se mantiene casi constante frente a variaciones en VR1.

También se ha estudiado si la constante de tiempo variaba a lo largo del rango de valores de VR2, pero, al menos con el tiempo de muestreo con el que se ha realizado el ensayo, no se pueden apreciar cambios notables en la constante de tiempo.

3.1.2 Ensayo de escalón y modelo de primer orden del caudal FT frente a la válvula VR1

El ensayo de escalón en torno al punto de operación normal de la planta permite obtener una primera aproximación de la relación que existe entre el caudal y la apertura de la válvula mediante un modelo de primer orden.

Para la obtención de este modelo se han aprovechado los resultados obtenidos durante el ensayo realizado para la obtención de la característica estática de FT frente a VR1. Eligiendo como punto de operación VR1=30, punto en el cual se tiene un caudal que aproximadamente mantiene constante el nivel del tanque, podemos observar la respuesta del sistema en cuanto al caudal medido para un escalón de amplitud 10 en VR1 (VR1 de 30 a 40):

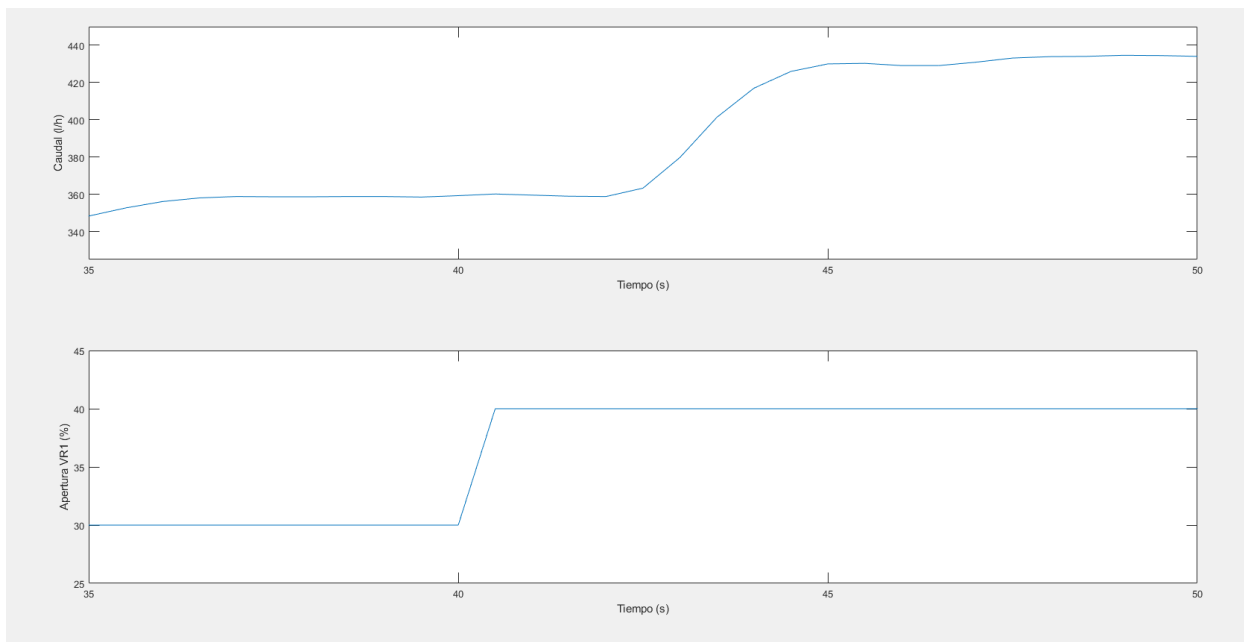


Figura 3.5 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de caudal FT frente a VR1.

Como se puede observar, el cambio en VR1 no produce un cambio simultáneamente en FT, sino que existe un cierto retraso, si bien razonablemente pequeño, entre que se actúa en VR1 y se aprecian cambios en el caudal FT. También se ha de tener en cuenta que el hecho de que se cambie la referencia en VR1 no significa que la válvula real alcance dicha referencia instantáneamente, sino que será a su vez un proceso con una cierta dinámica. Esto es también apreciable en este ensayo, ya que el caudal también presenta una cierta dinámica en el escalón, aunque nuevamente también bastante rápida.

A partir de estos resultados se pueden obtener los parámetros del modelo de primer orden del caudal FT frente a VR1:

$$K = \frac{\Delta FT}{\Delta VR1} = \frac{(434.6 - 358.8)}{(40 - 30)} = \frac{75.8}{10} = 7.58$$

$$\tau \approx 2$$

$$L \approx 2$$

Sabiendo que un sistema de primer orden con retraso viene dado por la siguiente ecuación [5]:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}$$

El modelo de primer orden de FT frente a VR1 será:

$$G(s) = \frac{7.58}{2s + 1} e^{-2s}$$

Como ya se ha mencionado antes, este modelo será de utilidad a la hora de diseñar el controlador en cascada mediante el método AMIGO de ajuste de controladores PID.

3.1.3 Caracterización de la válvula VA1 de descarga del tanque de agua: caudal máximo sin desbordamiento para distintos valores de la válvula VA1

Para poder establecer una relación entre el caudal de funcionamiento del sistema con el que se mantiene el nivel constante e igual a una referencia máxima y el valor de la válvula VA1, que regula la velocidad a la que se desaloja agua del contenedor, se ha establecido el siguiente ensayo:

- 1) Mediante un controlador PID simple que lleve y mantenga el nivel de agua del contenedor a una referencia marcada de nivel, próxima al límite superior del tanque, se puede obtener un valor aproximado del caudal máximo que se puede impulsar sin que el tanque desborde. En este caso, la referencia de nivel que se ha fijado ha sido **LT = 35 cm**.
- 2) Una vez que se haya alcanzado esta referencia y el valor del caudal se mantenga relativamente constante (con algunas oscilaciones con respecto al punto de equilibrio en el que el nivel se mantiene constante), se modifica el valor VA1 en -0.1 y se vuelve a repetir el proceso.
- 3) El proceso se repite a lo largo de gran parte del rango de funcionamiento de VA1, desde VA1=4.0 a VA1=0.6.

Los resultados obtenidos al realizar este mismo ensayo son los siguientes:

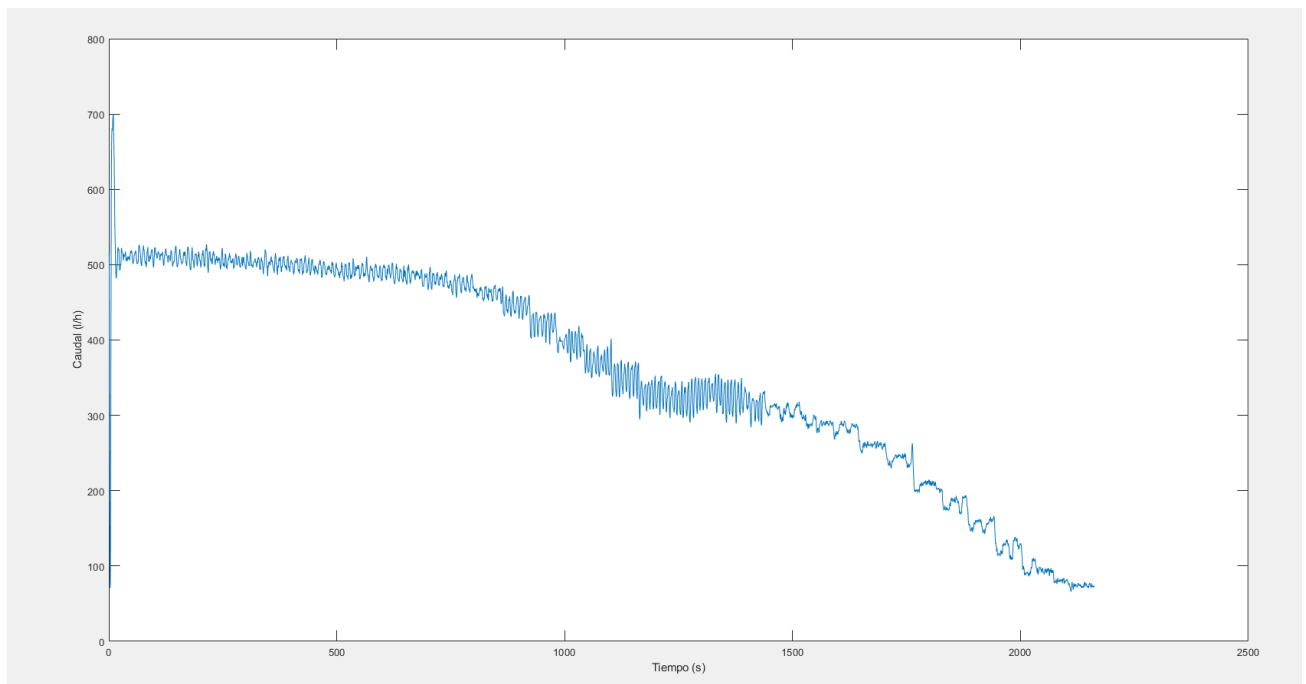


Figura 3.6 – Ensayo para caracterización de la válvula VA1 frente al caudal máximo que evita el desbordamiento del tanque.

Y filtrando la señal para que se pueda observar más claramente cuándo se producen los escalones, el resultado es el siguiente:

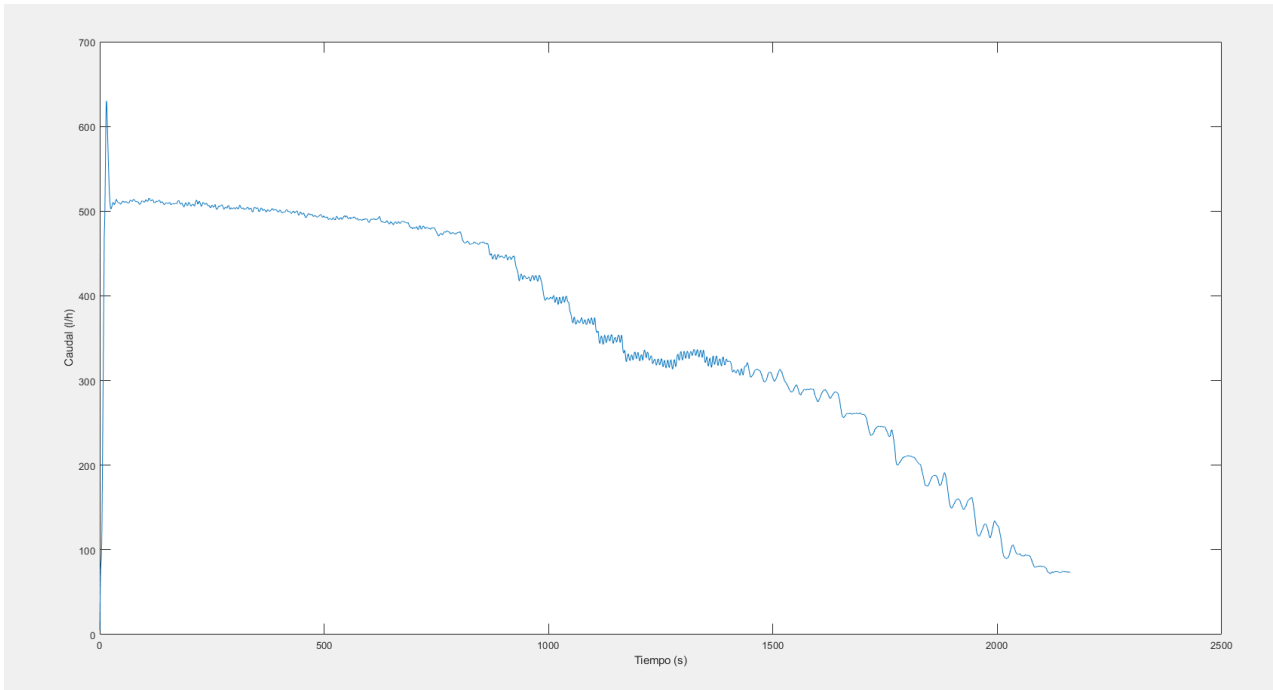


Figura 3.7 – Ensayo de caracterización de VA1 frente a caudal máximo filtrado.

Sacando la media de cada uno de los intervalos de tiempo que se corresponden a un valor de VA1 y enfrentándolas a cada uno de estos, se puede obtener una característica estática que relaciona este caudal máximo con la apertura de la válvula VA1:

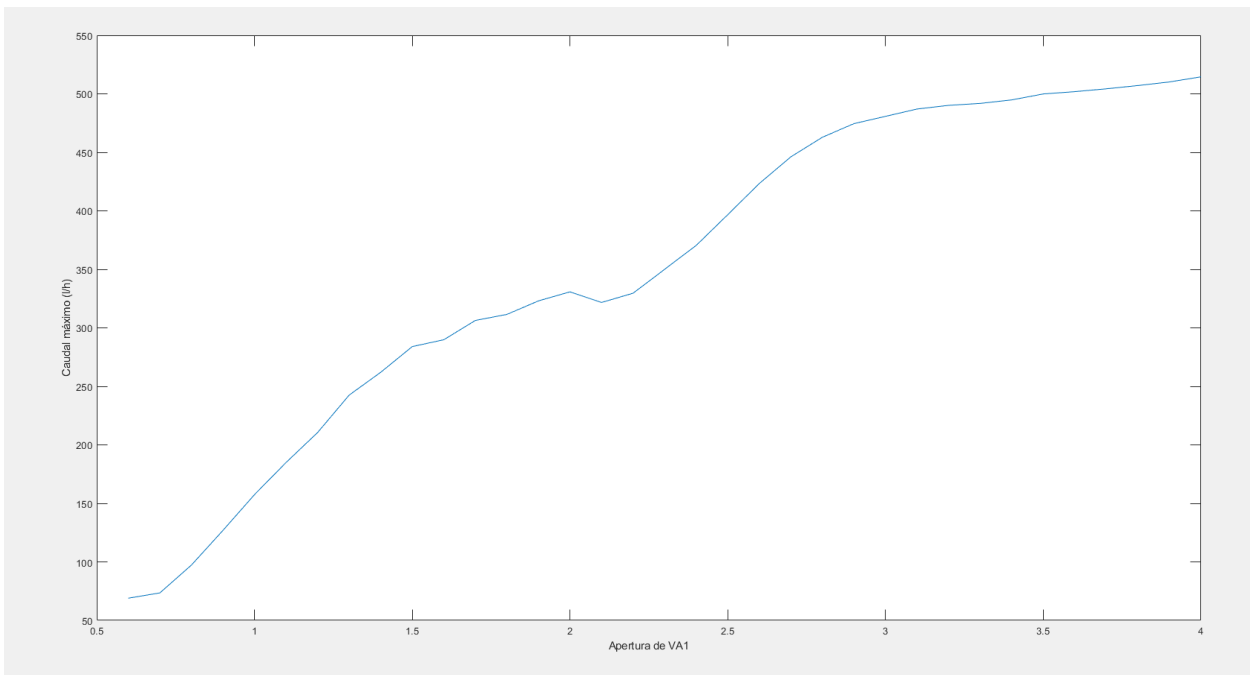


Figura 3.8 – Característica estática de VA1 frente a caudal máximo que evita desbordamiento del tanque.

Como era obvio, conforme se disminuye el valor de la válvula VA1 (que hace que el depósito se descargue más lentamente), el caudal que provoca el desbordamiento del depósito es también menor.

No obstante, se observa algo interesante cuando VA1 se encuentra en torno al valor VA1=2.3: a variaciones iguales de VA1, las diferencias en el caudal máximo son bastante pequeñas en comparación a las que se dan en otros valores, tanto mayores como menores, de VA1, de manera que la posición 2.3 es un punto de inflexión en la curva que relaciona la posición de la válvula con el caudal máximo.

Con esto concluye el apartado de identificación estática de la configuración 1 de la planta y se da paso a la identificación estática de la configuración 2. Más tarde se volverá a trabajar con esta configuración para el diseño y prueba de las estrategias de control planteadas.

3.2. Identificación estática de la configuración 2 de la planta

Al igual que para la configuración 1, se han llevado a cabo distintos ensayos para poder identificar el funcionamiento de la planta multiprocesos en la configuración 2 y observar cual es el comportamiento de la misma para distintas condiciones de funcionamiento. Los ensayos que se han propuesto han sido los siguientes:

- 1) Ensayos de escalón para las distintas variables de actuación: VR1, VR2, VR3, R1 y R2 (su duty cycle) y el efecto de cada una de estas variables sobre las temperaturas TT2 y TT9, que serán las principales variables a controlar de la planta en esta configuración, así como modelos de primer orden correspondientes a cada uno de los ensayos.
- 2) Caracterización de un intercambiador de calor para distintas temperaturas de entrada al intercambiador de referencia (TT2) y distintos valores de VR1. Para ello se controlará dicha temperatura TT2 mediante R1 y R2, a la vez que se controla la temperatura del agua que se devuelve al depósito colector de agua, que se corresponderá aproximadamente con TT4.

Estos ensayos de escalón permitirán tener una idea de qué variables de actuación afectan a qué temperaturas y en qué medida, que será de utilidad a la hora de asignar dichos actuadores a las distintas variables a controlar durante el diseño de las estrategias de control.

Por otro lado, los resultados del ensayo para la caracterización del intercambiador de calor podrán ser utilizados para elaborar un modelo del funcionamiento de dicho intercambiador, así como conocer mejor, en general, cómo se comporta el intercambiador en distintas condiciones.

3.2.1. Ensayos de escalón para las variables de actuación de la configuración 2

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos de escalón realizados, así como las condiciones de funcionamiento en las que se han realizado. Posteriormente, se obtendrá el modelo de primer orden correspondiente a cada ensayo en base a los resultados obtenidos, igual que ya se hizo anteriormente para la configuración 1.

Ensayo de escalón en VR1 frente a TT2

Para el ensayo, se fijan el resto de variables de actuación a los siguientes valores:

$$VR2 = 50\%, \quad VR3 = 0, \quad R1/R2 = 50\%$$

Por otro lado, el escalón se realizará desde VR1 = 20% hasta VR1 = 30%. Estos valores han sido escogidos para realizar el ensayo en unas condiciones que se podrían dar durante el funcionamiento normal de la planta.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo:

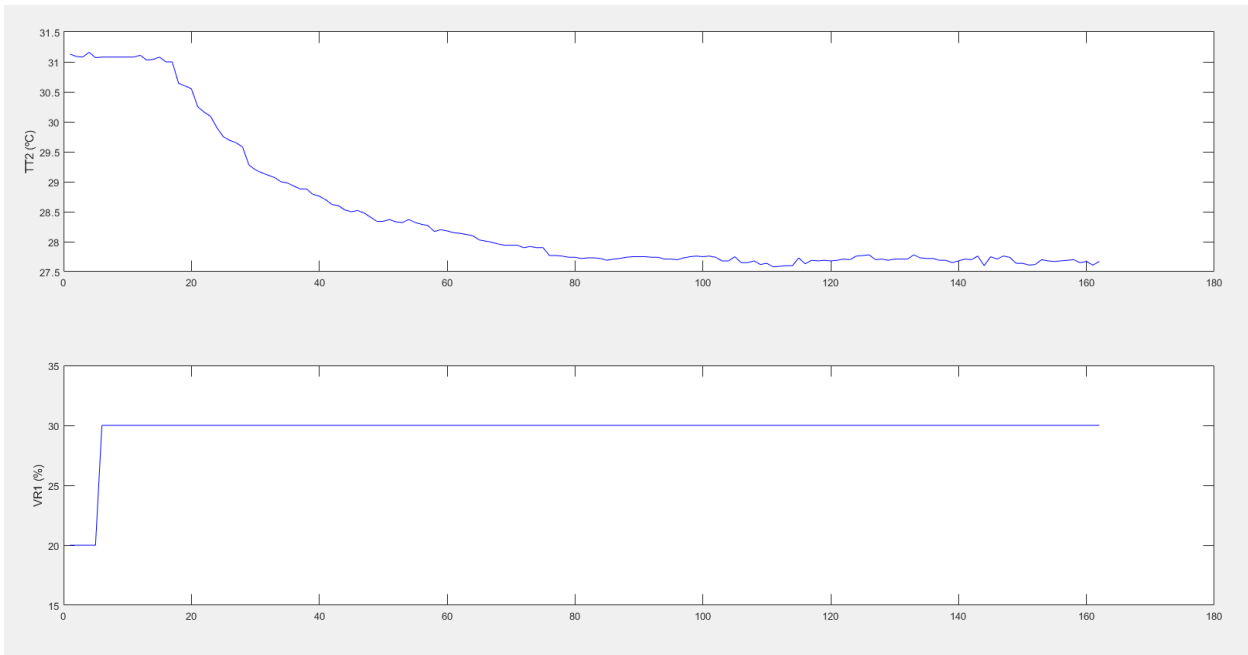


Figura 3.9 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR1 frente a TT2.

Se puede observar claramente cómo, al aumentar VR1, baja la temperatura TT2. Esto tiene bastante sentido: TT2 es la temperatura medida a la salida de las dos resistencias. Si VR1 aumenta, también lo hace el caudal impulsado y, por tanto, la velocidad a la que el agua recorre la correspondiente tubería. Si el agua se mueve más rápido, está menos tiempo en contacto con las resistencias y se calienta menos.

El modelo de primer orden que relaciona VR1 con TT2 según los resultados de este ensayo es el siguiente:

$$K = \frac{(27.77 - 31.08)}{(30 - 20)} = -0.331$$

$$\tau \approx 20 \text{ s}$$

$$L = 9 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{-0.331}{20s + 1} e^{-9s}$$

Ante estos resultados, es aparente que existe una gran dependencia entre TT2 y VR1, más concretamente, VR1 contrarresta en cierta manera el efecto que tiene la acción de las resistencias en TT2. Esto será algo a tener en cuenta a la hora de controlar dicha temperatura mediante las resistencias, ya que cualquier variación en VR1 se comportará como una perturbación con ganancia negativa en TT2.

Ensayo de escalón en VR1 frente a TT9

Para la identificación de VR1 frente a TT9, se fijan las mismas condiciones de funcionamiento, pero en este caso la amplitud del escalón será bastante más grande (de VR1 = 10% a VR1 = 50%), ya que como se podrá comprobar, la dependencia de TT9 con VR1 será mucho más pequeña a la que había para TT2.

Los resultados obtenidos para este ensayo son los siguientes:

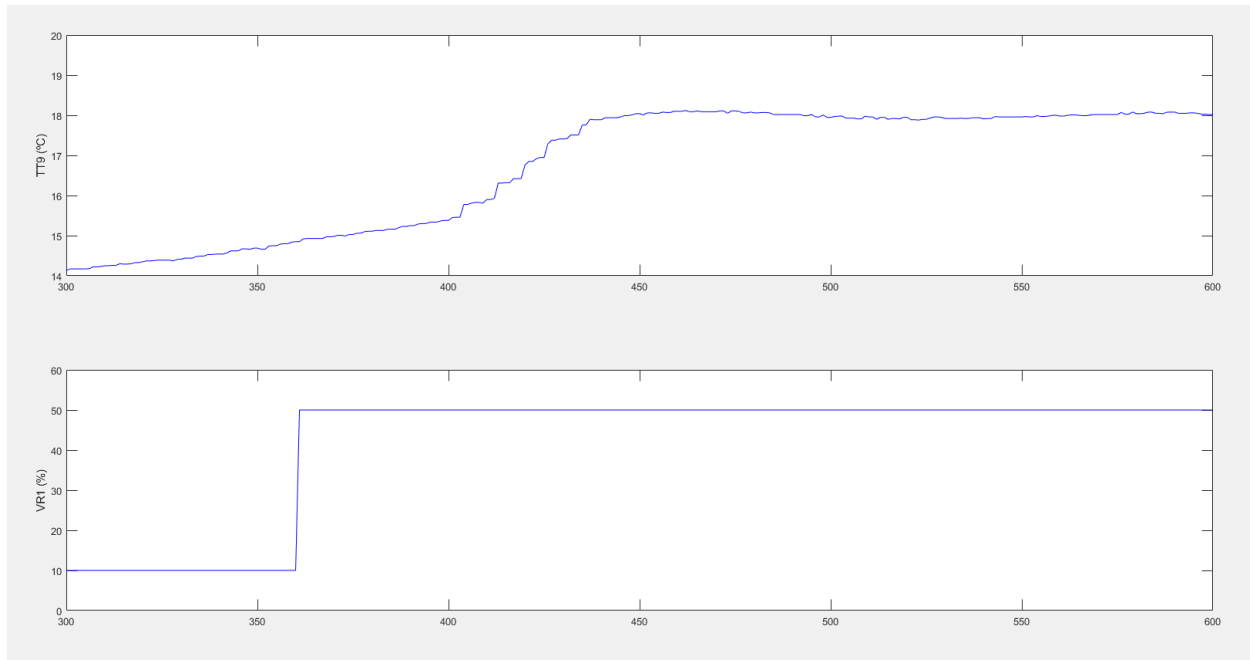


Figura 3.10 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR1 frente a TT9.

Como se puede observar, al contrario que ocurría para TT2, la dependencia de TT9 con VR1 es ahora directa: al aumentar VR1, aumenta también TT9. Este resultado también era de esperar: al aumentar VR1, aumenta también el volumen de agua que hay a la vez en el intercambiador de calor.

Al haber un mayor volumen de agua proveniente del depósito en el intercambiador de calor, pero el mismo volumen de agua proveniente de la planta de frío, el agua impulsada se enfriará menos de lo que lo haría un volumen menor. Por otro lado, por lo general, la temperatura del agua impulsada del depósito colector va a ser siempre mayor que el agua proveniente de la planta de frío, por lo que esta relación se va a respetar siempre.

Durante el ensayo también se puede observar otro efecto que no está relacionado con el escalón en sí: aunque VR1 se mantiene fija al principio del ensayo y el resto de variables también se mantienen constantes, se observa una variación en la temperatura medida en TT9.

Estas variaciones son debidas a una dependencia de TT9 con la temperatura del agua de la planta de frío, que se mantiene siempre en torno a un punto medio (rondando los 8 °C) pero siempre oscilando alrededor de este punto.

Esta dependencia es mucho más apreciable cuanto más próxima a la temperatura del agua fría está la temperatura medida en TT9 (como se puede observar tras realizarse el escalón en VR1, donde la temperatura TT9 aumenta y se siguen observando oscilaciones, pero de amplitud mucho menor). Más adelante se estudiará más a fondo esta dependencia y se propondrán medidas para intentar mitigarla en la medida de lo posible.

Continuando con el propio ensayo de escalón, el modelo de primer orden que se obtiene a partir de estos resultados es el siguiente:

$$K = \frac{(17.97 - 15.46)}{(50 - 10)} = \frac{2.51}{40} \approx 0.063$$

$$\tau \approx 22 \text{ s}$$

$$L \approx 44 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{0.063}{22s + 1} e^{-44s}$$

En este caso, la dependencia de TT9 con VR1 es mucho menos pronunciada de lo que era para TT2: para un valor bastante bajo TT9 y un escalón del 40% del rango de funcionamiento de VR1, sólo se consigue aumentar la temperatura de TT9 en unos 2.5 °C. Así, no tiene mucho sentido utilizar VR1 directamente para controlar la

temperatura TT9, pero sí que será un factor a tener en cuenta durante el control de TT9.

Ensayos de escalón en VR2 y VR3 de los intercambiadores de calor

Como ya se ha comentado, los intercambiadores de calor están colocados justo después de las resistencias en el camino que sigue el agua en la configuración 2 de la planta. Coincidentemente, la temperatura TT2 es aquella que se mide justo después de las resistencias y antes de los intercambiadores de calor. De esta manera, la temperatura TT2 no va a depender, en principio, de la actuación en VR2 y VR3.

Esta última afirmación no es del todo cierta: al actuar sobre VR2 y VR3, se modifica la temperatura del agua que termina volviendo al depósito colector, que precisamente va a ser la que vuelva a pasar por las resistencias y cuya temperatura será medida en TT2.

Así, si mediante VR2 y VR3 se hace, por ejemplo, que la temperatura del agua que se devuelve al depósito sea menor, dado un intervalo de tiempo suficientemente largo, la temperatura de todo el volumen de agua del depósito también disminuirá, y por lo tanto esto sí que tendrá un efecto en la temperatura medida en TT2. No obstante, este efecto se va a obviar, ya que el tiempo necesario para que este efecto sea apreciable es demasiado grande en comparación con el resto de dinámicas del sistema.

Es por esto que, para los ensayos de escalón que se han realizado para VR2 y VR3, sólo se ha mostrado interés en el efecto producido en TT9 y no en TT2.

Las condiciones de funcionamiento que se han establecido para estos dos ensayos son las siguientes:

$$R1 = R2 = 30 \%, \quad VR1 = 30\%$$

Por otro lado, para el ensayo sobre VR2, VR3 y mantiene a 0, y viceversa, y el escalón se realizará desde VR2 = 30% (o VR3 = 30%, según corresponda) hasta VR2 = 50% (o VR3).

Así, los resultados que se han obtenido al realizar estos ensayos son los siguientes:

VR2 – TT9

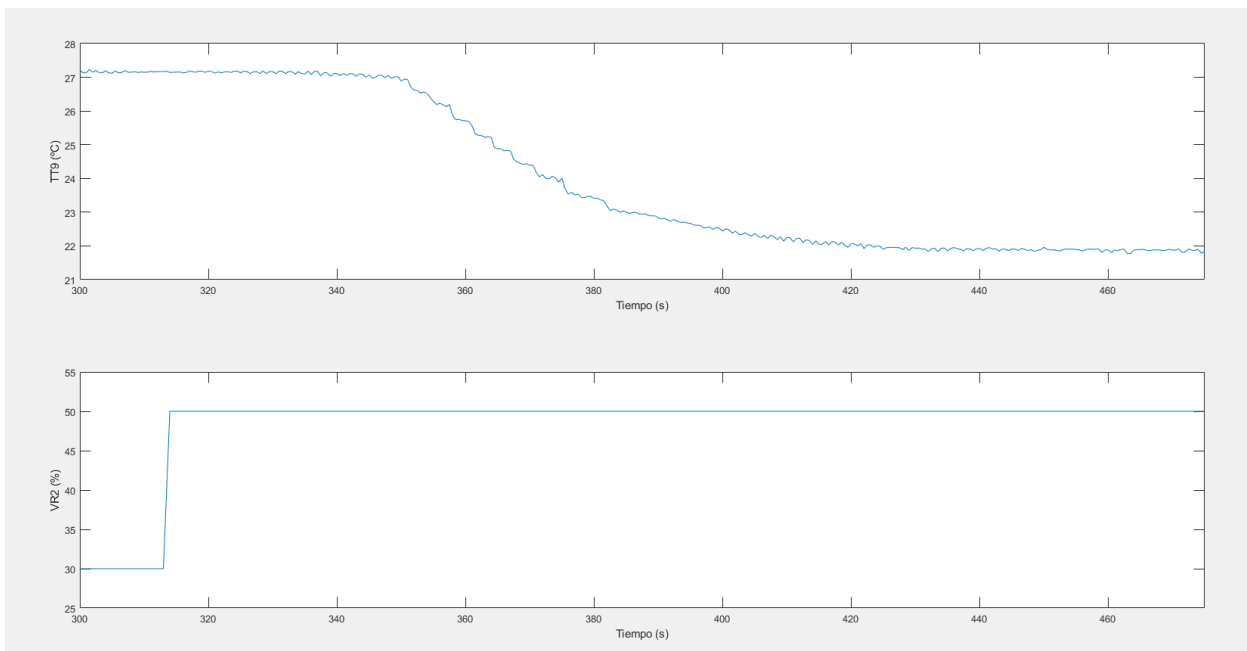


Figura 3.11 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR2 frente a TT9.

VR3 – TT9

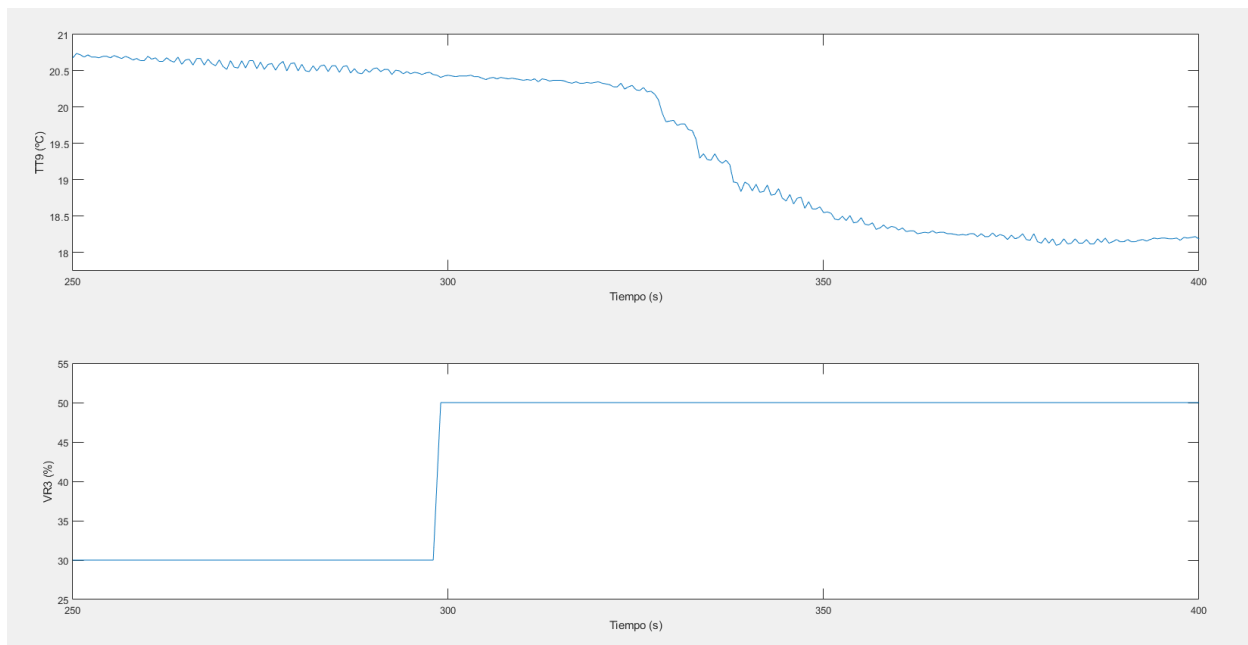


Figura 3.12 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de VR3 frente a TT9.

Los modelos de primer orden que se obtienen a partir de estos resultados son los siguientes:

$$K_{VR2} = \frac{(21.89 - 27.01)}{20} = \frac{-5.12}{20} = -0.256$$

$$\tau \approx 25 \text{ s}$$

$$L \approx 35 \text{ s}$$

$$G_{VR2} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{-0.256}{25s + 1} e^{-35s}$$

$$K_{VR3} = \frac{(18.21 - 20.3)}{20} = \frac{-2.09}{20} = -0.1045$$

$$\tau \approx 15 \text{ s}$$

$$L \approx 26 \text{ s}$$

$$G_{VR3} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{-0.1045}{15s + 1} e^{-26s}$$

Como se puede observar, existen algunas diferencias claras entre la respuesta en TT9 ante un cambio igual en los dos intercambiadores de calor. En primer lugar, la ganancia del primer intercambiador, controlador por VR2, es mayor según los resultados obtenidos. No obstante, esto es debido más bien a la diferencia de temperatura de la que se parte que a la acción del intercambiador de calor en sí.

Esta temperatura inicial va a depender de la temperatura que tenga el agua en el depósito colector, que a su vez dependerá, aunque con unas constantes de tiempo muy grandes, de la acción en VR2, VR3 y las resistencias R1 y R2. Por otro lado, la ganancia del intercambiador de calor depende también del salto de temperatura entre la corriente caliente de agua y la corriente fría. El intercambiador de calor es más efectivo cuando el salto de temperatura es mayor. De ahí que, al ser mayor el salto de temperatura para el primero de los intercambiadores ha sido mayor que el que se tenía para el segundo intercambiador de calor, la ganancia del primero también ha

sido mayor que la del segundo.

Por otro lado, como era de esperar, la parte en la que más diferencias hay entre la actuación en VR2 y VR3 es el retraso. Debido a que VR2 es la válvula que actúa sobre el primero de los dos intercambiadores de calor por los que pasa el agua en su recorrido, su distancia con respecto al punto donde es medida la temperatura TT9 es mayor que para VR3, que se encuentra a continuación de éste, y por tanto el retraso en la actuación es mayor.

Además, la constante de tiempo de VR3 es también menor a la de VR2, lo cual es debido a que la dinámica del intercambiador de calor cambia también dependiendo del punto de operación, como ya ocurría con la ganancia estática.

A partir de estos resultados, es obvio que VR3 va a ser, por lo general, más efectiva a la hora de controlar TT9 que VR2, principalmente debido al menor retraso que existe en la actuación, un problema bastante común a la hora de realizar el control de un sistema.

Ensayos de escalón en R1 y R2 frente a TT2 y TT9

En el caso de las resistencias R1 y R2, sí que es de interés identificar su efecto sobre las dos temperaturas a medir, TT2 y TT9, ya que ambos sensores están colocados después de las resistencias en el recorrido que sigue el agua.

Como ya se ha explicado antes, el funcionamiento de las resistencias se controla mediante la fijación de su duty cycle, es decir, dado un periodo de tiempo específico de funcionamiento de las resistencias, mediante su duty cycle se puede configurar qué porcentaje de tiempo de dicho periodo estará la resistencia activa o inactiva.

Por otro lado, tanto para la identificación como para el control mediante R1 y R2, se ha optado por hacer que el duty cycle sea el mismo para R1 y para R2, de manera que únicamente se ha trabajado con un duty cycle que afecta a las dos resistencias.

El ensayo en escalón será el mismo para TT2 y para TT9, y las condiciones de funcionamiento de la planta que se han fijado han sido las siguientes:

$$VR1 = 30\%, \quad VR2 = 50\%, \quad VR3 = 0$$

El valor inicial del duty cycle de las resistencias ha sido de un 30%, y se ha realizado un escalón de un 20% de amplitud (hasta el 50%).

Los resultados que se han obtenido para cada una de las temperaturas han sido los siguientes:

R1/R2 – TT2

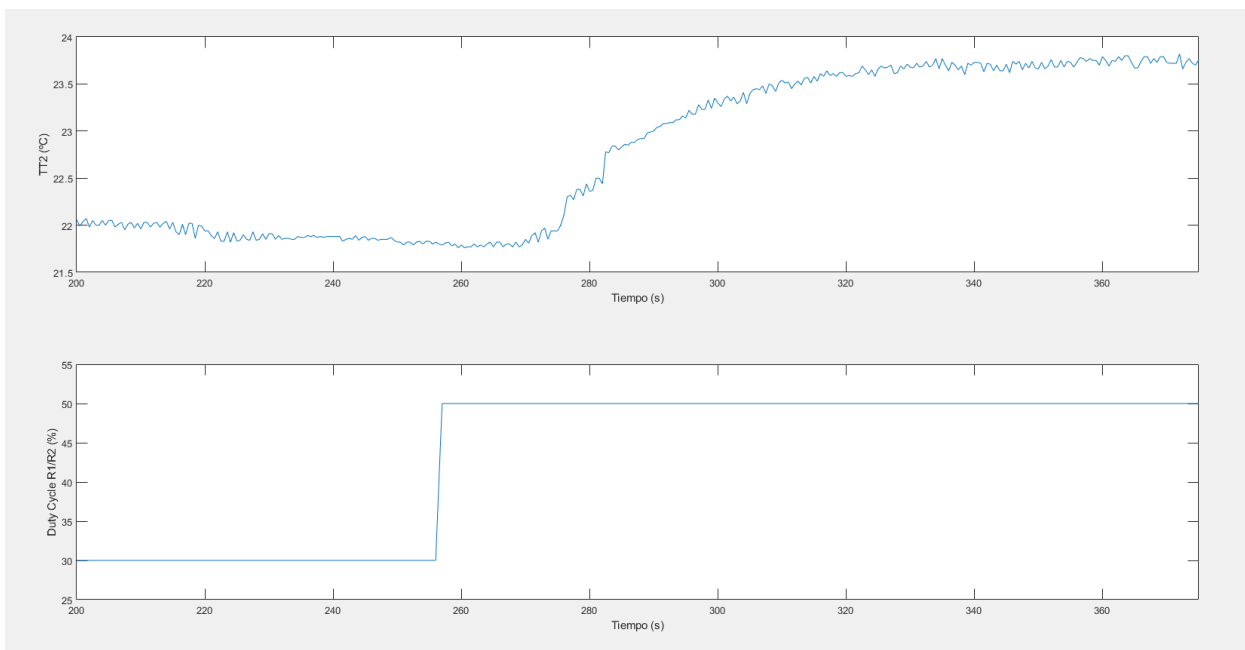


Figura 3.13 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de R1/R2 frente a TT2.

Con estos resultados, el modelo de primer orden que se obtiene es el siguiente:

$$K = \frac{(23.81 - 21.82)}{20} = \frac{1.99}{20} = 0.0995$$

$$\tau \approx 25 \text{ s}$$

$$L \approx 17 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{0.0995}{25s + 1} e^{-17s}$$

R1/R2 – TT9

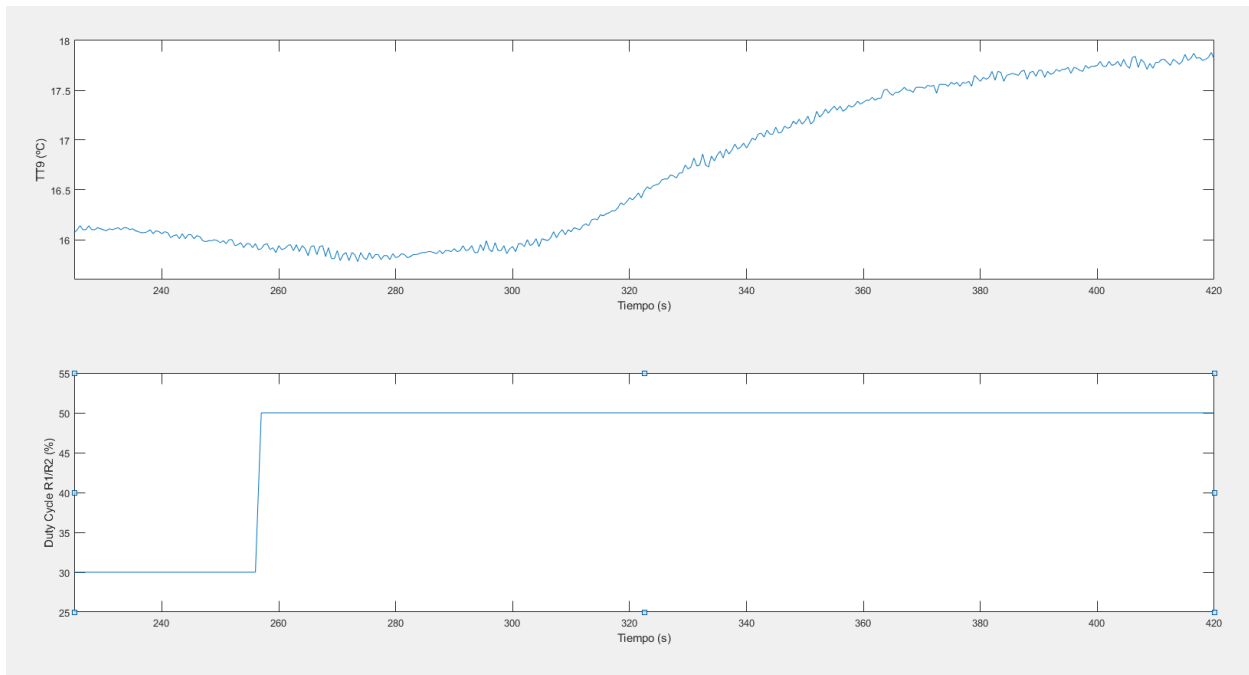


Figura 3.14 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de R1/R2 frente a TT9.

De lo cual se obtiene el siguiente modelo de primer orden:

$$K = \frac{(17.82 - 15.9)}{20} = \frac{1.92}{20} = 0.096$$

$$\tau \approx 42 \text{ s}$$

$$L \approx 48 \text{ s}$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} = \frac{0.096}{42s + 1} e^{-48s}$$

Como se puede observar, el efecto de las resistencias es aparente en las dos temperaturas. Como se verá más adelante, en la parte de diseño e implementación de las estrategias de control de la configuración 2, las dos resistencias se utilizarán para controlar la temperatura TT2, mientras que la temperatura TT9 se controlará mediante las válvulas VR2 y VR3. No obstante la acción que se produzca en las mismas para el control de TT2 acabará acoplándose a la temperatura TT9 ya que ésta depende directamente de TT2.

Éste era el último de los ensayos de escalón que se habían propuesto para la identificación estática de la planta en la configuración 2. A continuación, se va a pasar a realizar la caracterización de uno de los intercambiadores de calor.

3.2.2. Ensayos para caracterización de uno de los intercambiadores de calor de la planta

El propósito de este apartado ha sido el realizar una serie de ensayos que permitan obtener un modelo del primer intercambiador de calor partiendo de que se asume la característica estática de la temperatura de salida del intercambiador de calor (TT3) como una función de las temperaturas de entrada (TT2 y TT5) y de los caudales de agua de las dos corrientes (VR1 y VR2).

Los ensayos que se han realizado se han configurado de la siguiente forma:

- En cada uno de los ensayos se establece una referencia de TT2, que se alcanzará mediante la acción de las resistencias R1 y R2, las cuales dispondrán de un controlador PID simple, y también se establece un valor fijo de VR1. En total se realizan nueve ensayos distintos: las 9 combinaciones posibles de tres valores de referencia de TT2 (20 °C, 23 °C y 26 °C) y tres valores de VR1 (33%, 66% y 100%).
- Se establece también una referencia de la temperatura del agua del depósito colector, o lo que es lo mismo, de TT1, medida justo antes del paso del agua por las resistencias. Esta temperatura es también la que intenta regular el intercambiador de calor que es objeto de estudio, mediante la acción de un controlador PID simple.
- Se realizarán escalones de amplitud 10%, desde 0 a 100%, de VR2, con el fin de comprobar cómo afecta la acción del intercambiador de calor a las distintas temperaturas a medir a lo largo del rango de operación de éste.

Las variables cuyos resultados son de mayor interés en estos ensayos son, sobre todo, la acción del propio intercambiador de calor (VR2), así como las 4 temperaturas de entrada/salida del mismo:

- TT2: temperatura de entrada al intercambiador de calor del agua proveniente del depósito colector.
- TT3: temperatura de salida del intercambiador de calor del agua que se devolverá al depósito colector.
- TT5: temperatura de entrada al intercambiador de calor del agua proveniente de la planta de frío.
- TT7: temperatura de salida del intercambiador de calor del agua que se devuelve a la planta de frío.

Estas cuatro temperaturas, así como la propia acción de la válvula VR3 del intercambiador de calor, servirán para poder tener una mejor idea de cómo se comporta el intercambiador de calor.

Con el fin de presentar los resultados de los ensayos de la manera más clara posible y para que se puedan apreciar simultáneamente los cambios en VR2 y su efecto en las temperaturas, los resultados se van a mostrar primero para las temperaturas de entrada y salida de uno de los caudales de agua (junto con las referencias que se dan en cada momento a las válvulas VR2 y VR3) y, a continuación, lo mismo, pero para el otro caudal de agua. Además, se mostrarán también las temperaturas medidas para el agua del depósito colector, con el fin de comprobar si se sigue la referencia marcada.

Además, los resultados obtenidos se utilizarán posteriormente con dos propósitos:

- En primer lugar, poder obtener una malla de puntos que relacione los valores de TT2, VR2 y TT3, para cada uno de los caudales VR1 con los que se ha trabajado y conseguir llegar a una expresión de $TT3 = f(TT2, VR2, VR1)$.
- Por otro lado, identificar el acoplamiento de las oscilaciones de TT5 en TT3, en forma de una simple ganancia estática, para determinar en qué medida afectan dichas oscilaciones de TT5 de la planta de frío a la temperatura del agua que circula por el resto de la planta en su paso por el intercambiador de calor.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de estos ensayos:

Referencia de TT2 = 20 °C, referencia de TT1 = 17 °C, VR1 = 33%

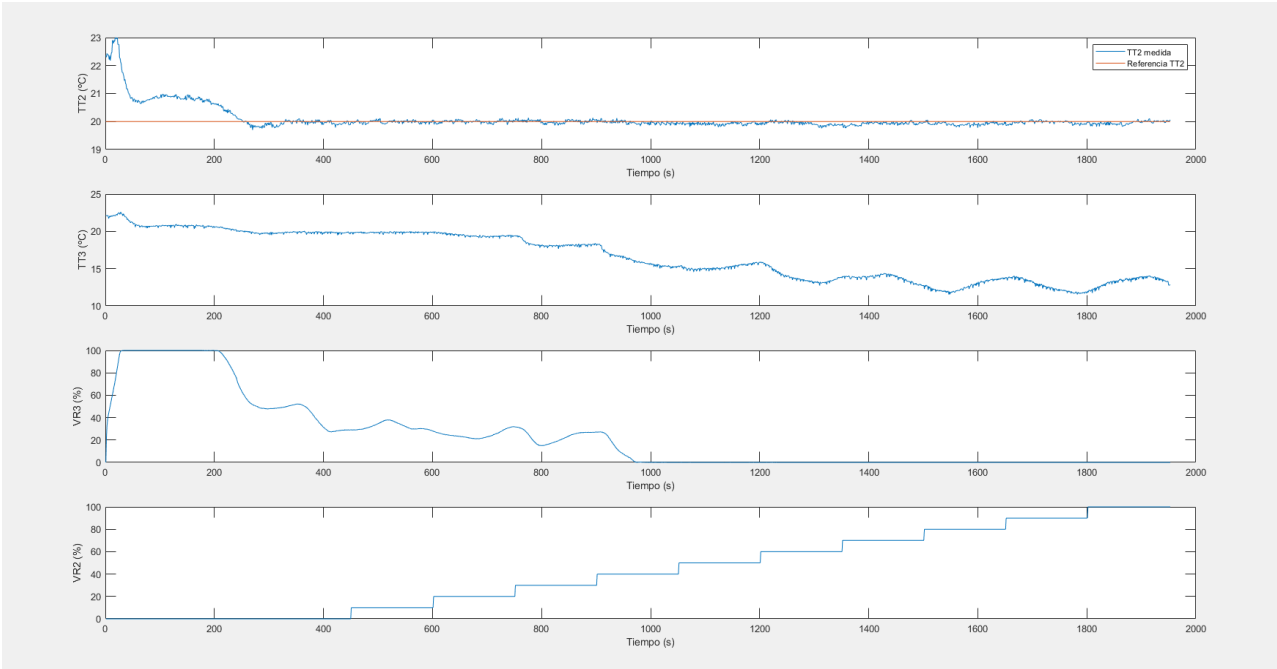


Figura 3.15 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=33%.

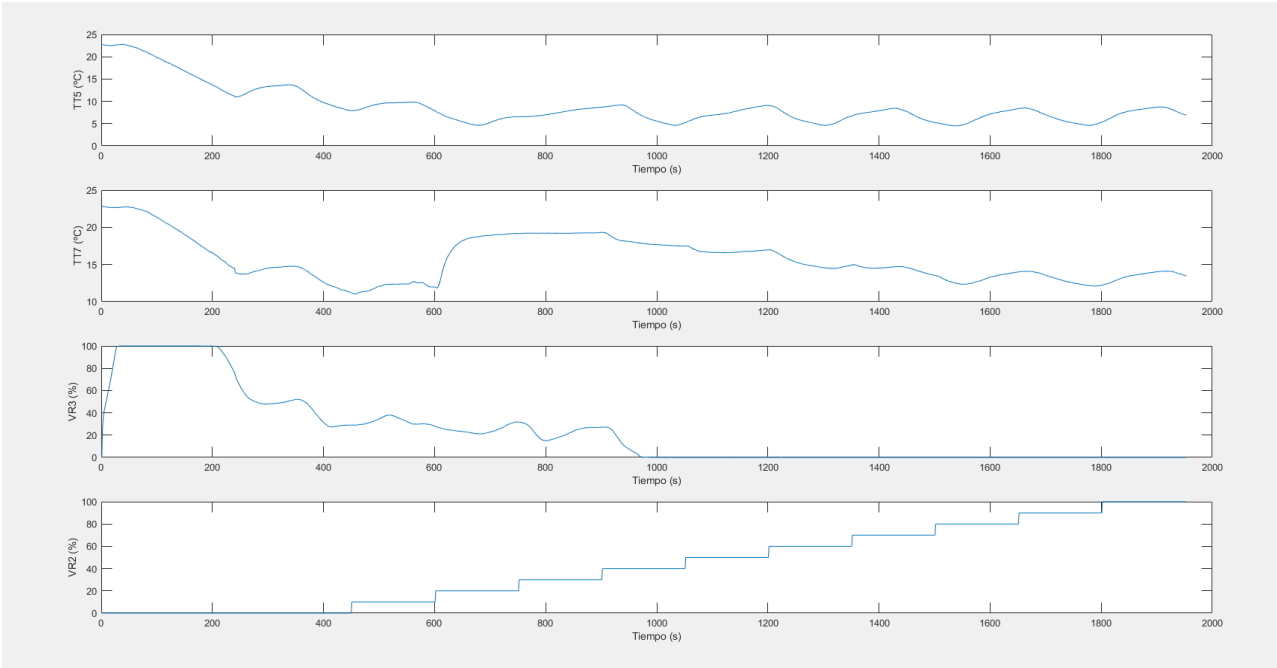


Figura 3.16 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=20 °C y VR1=33%.

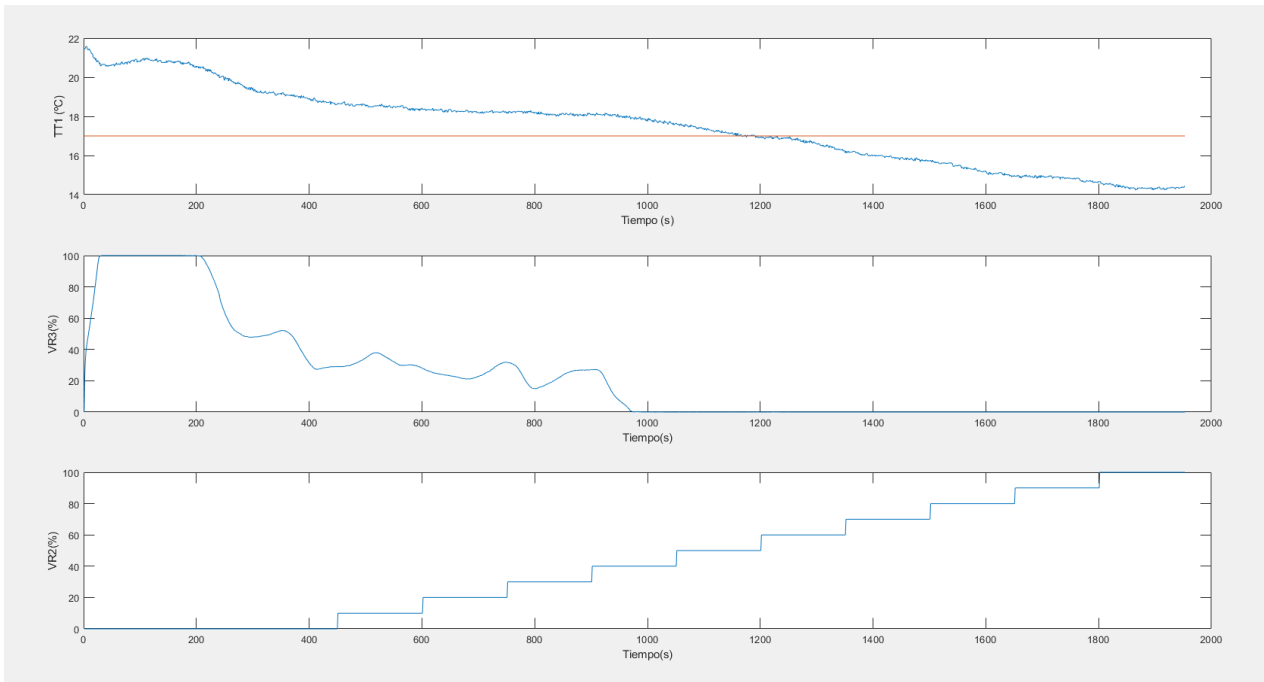


Figura 3.17 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ °C}$ y $VR1=33\%$.

Referencia de $TT2 = 23\text{ °C}$, referencia de $TT1 = 17\text{ °C}$, $VR1 = 33\%$

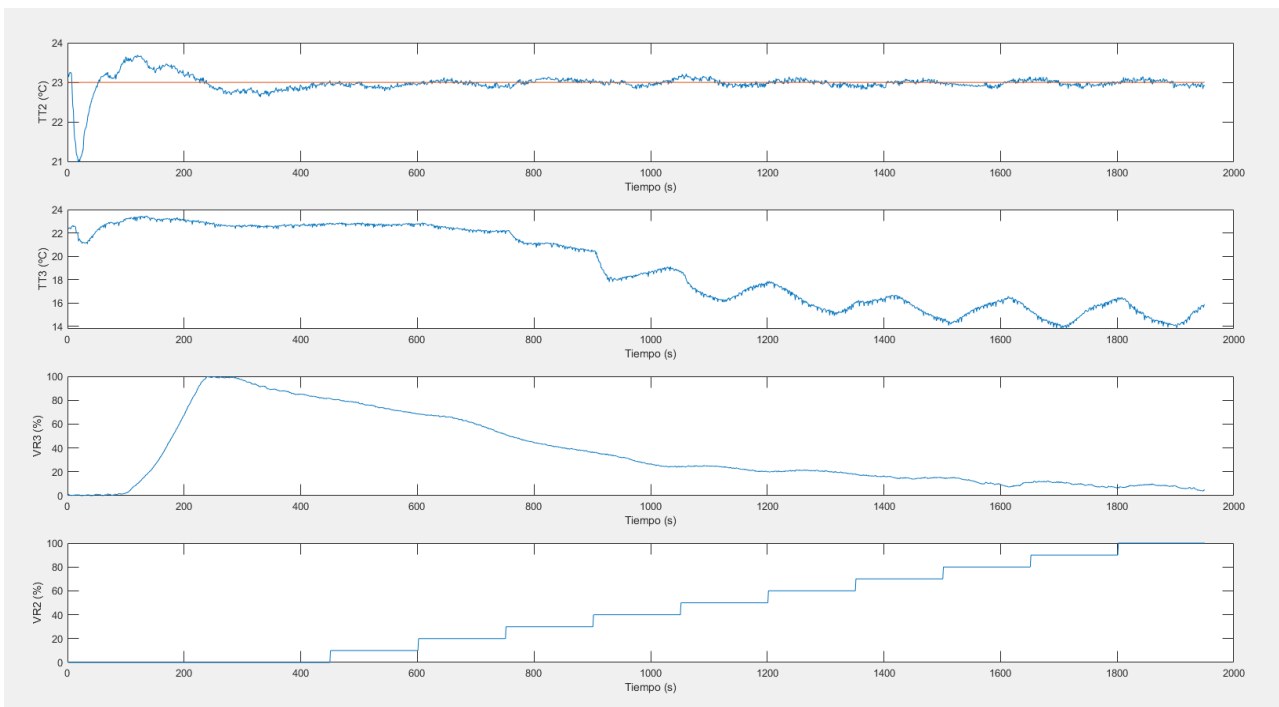


Figura 3.18 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=23\text{ °C}$ y $VR1=33\%$.

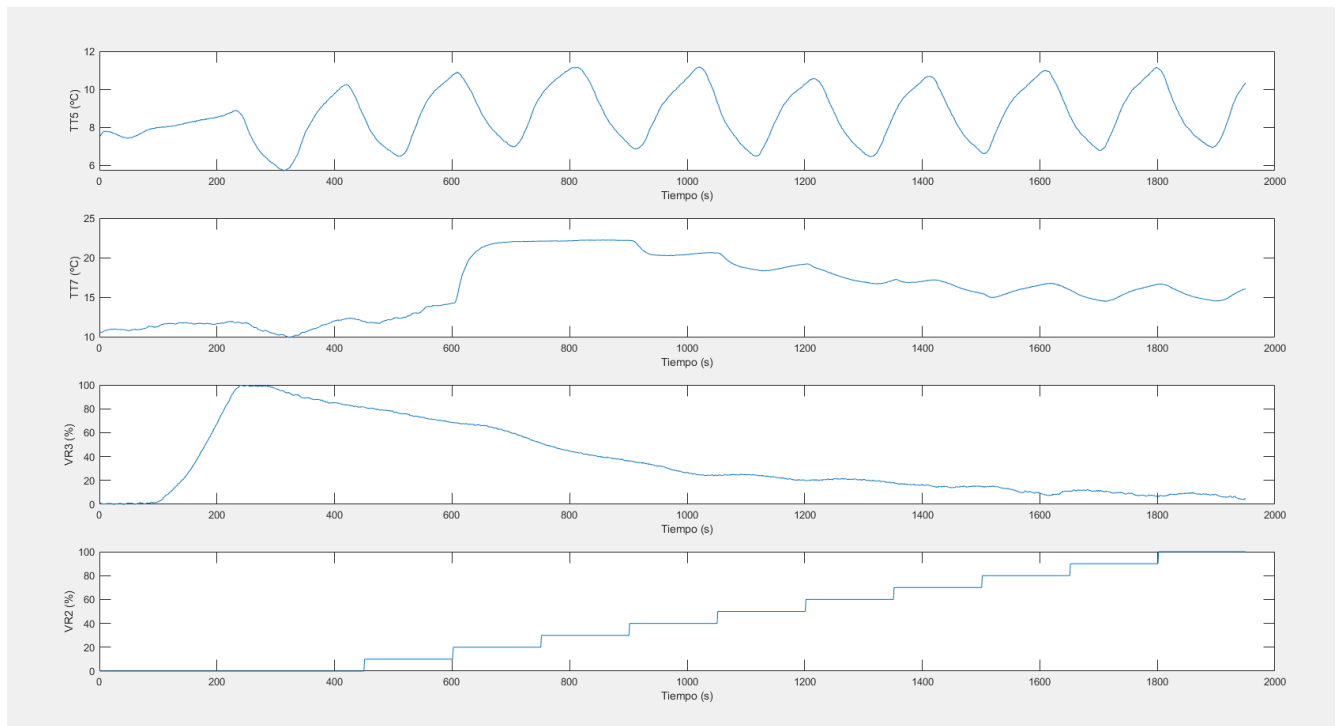


Figura 3.19 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT_2=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR_1=33\%$.

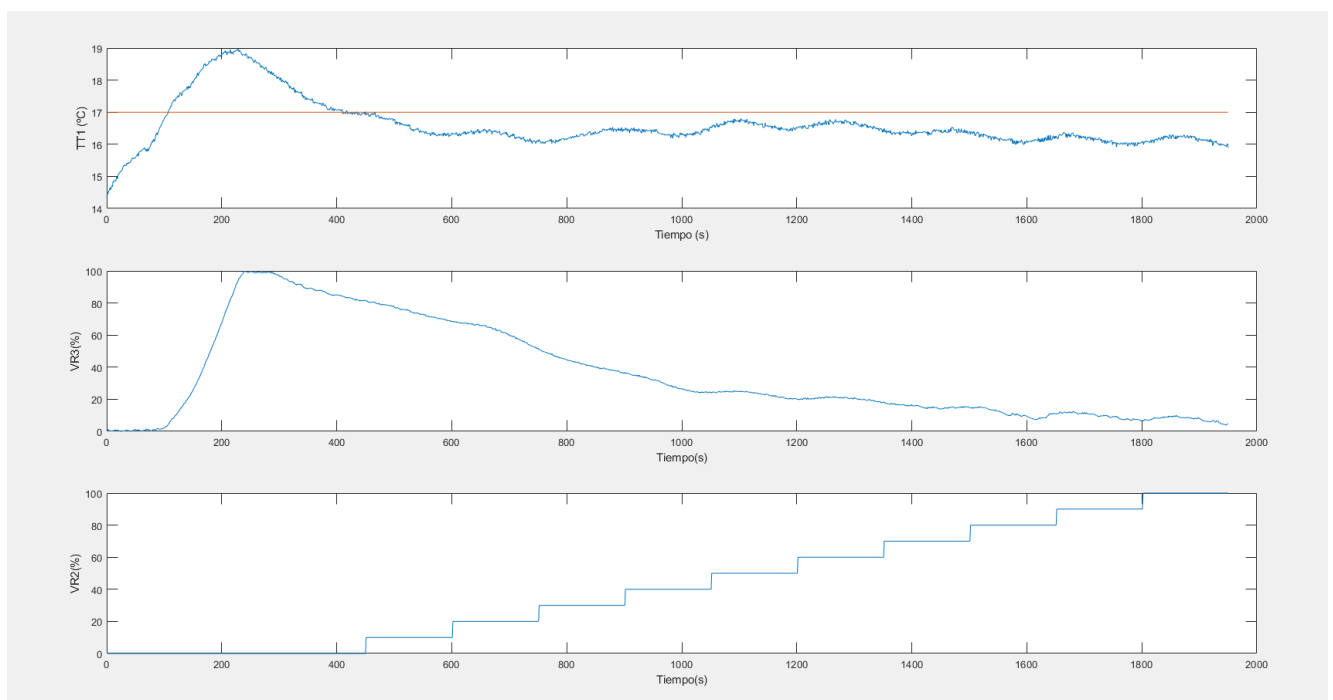


Figura 3.20 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT_2=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR_1=33\%$.

Referencia de $TT2 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, referencia de $TT1 = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $VR1 = 33\%$

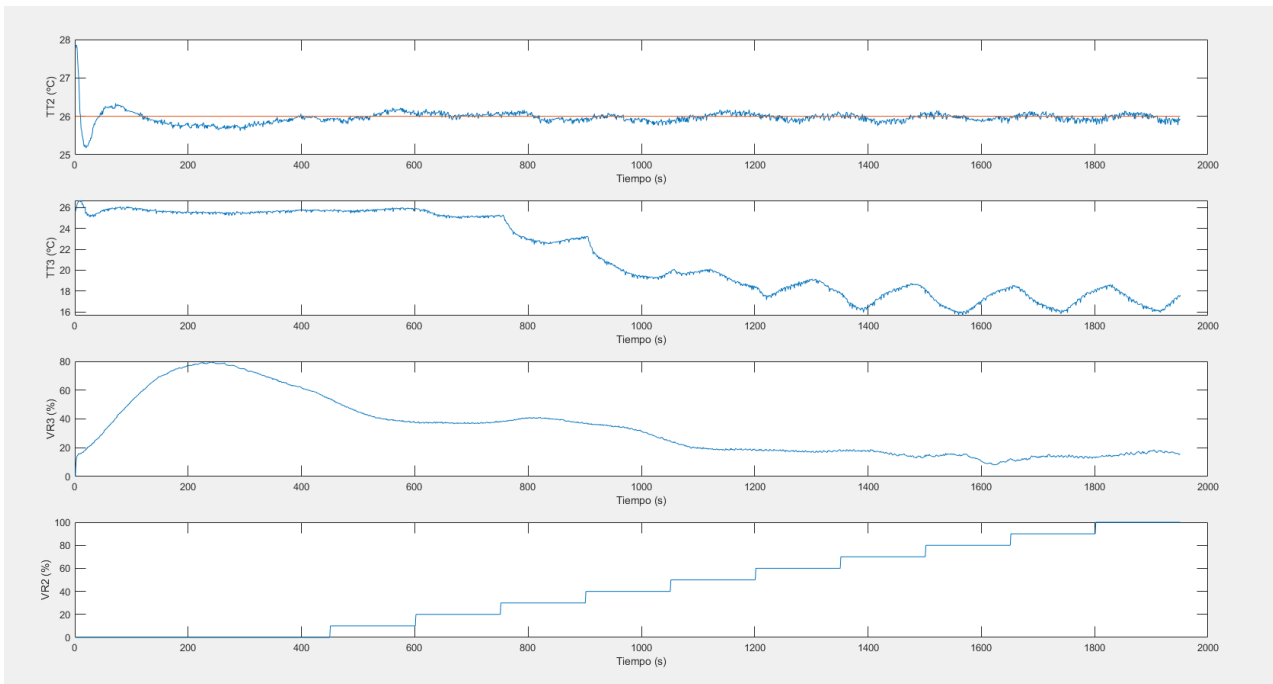


Figura 3.21 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=33\%$.

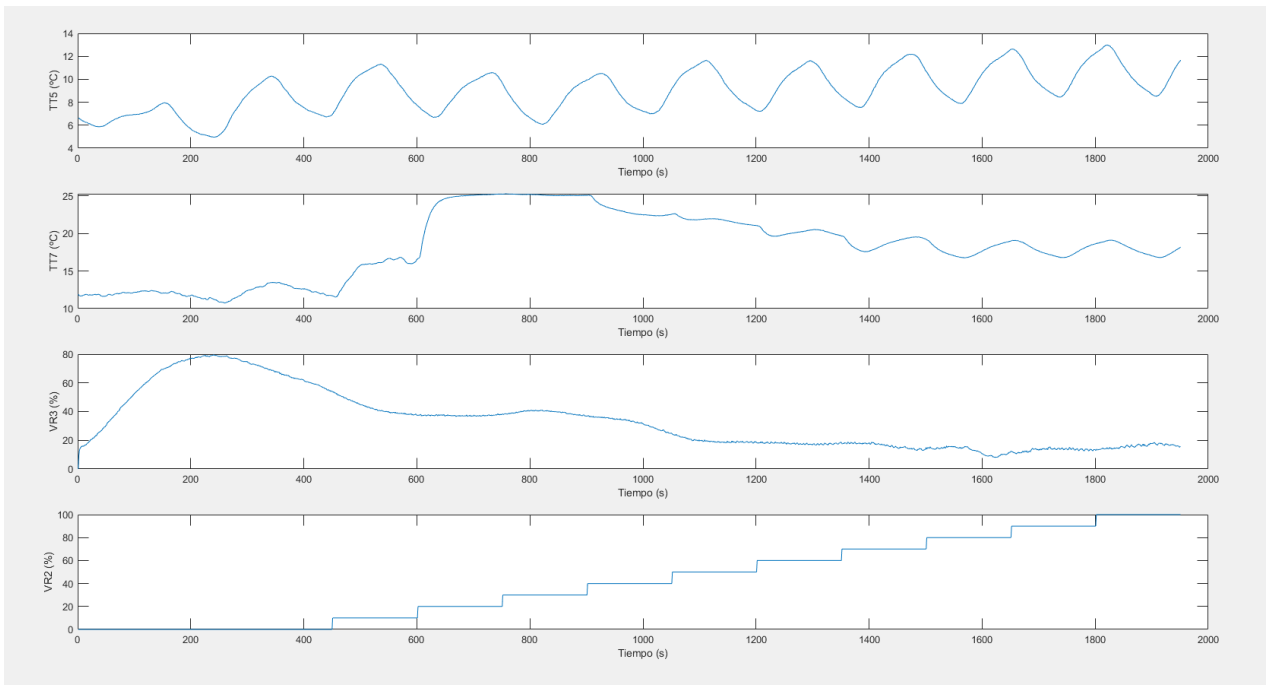


Figura 3.22 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=33\%$.

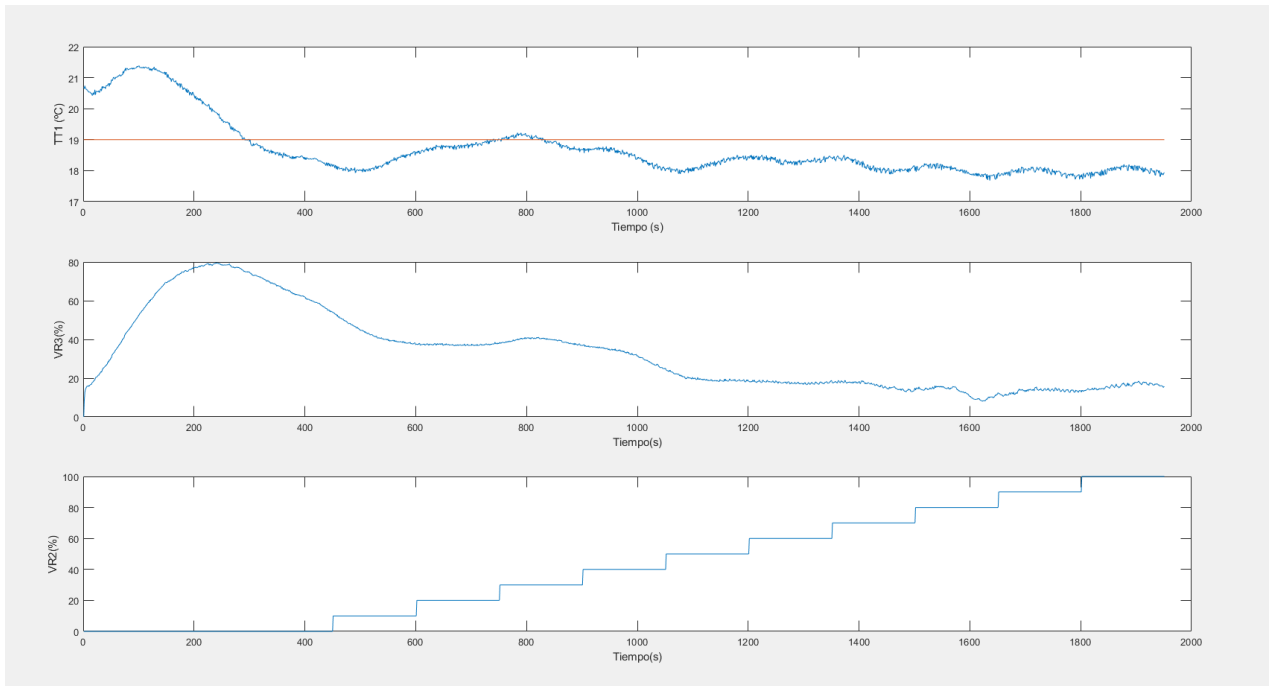


Figura 3.23 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ °C}$ y $VR1=33\%$.

Referencia de $TT2 = 20\text{ °C}$, referencia de $TT1 = 17\text{ °C}$, $VR1 = 66\%$

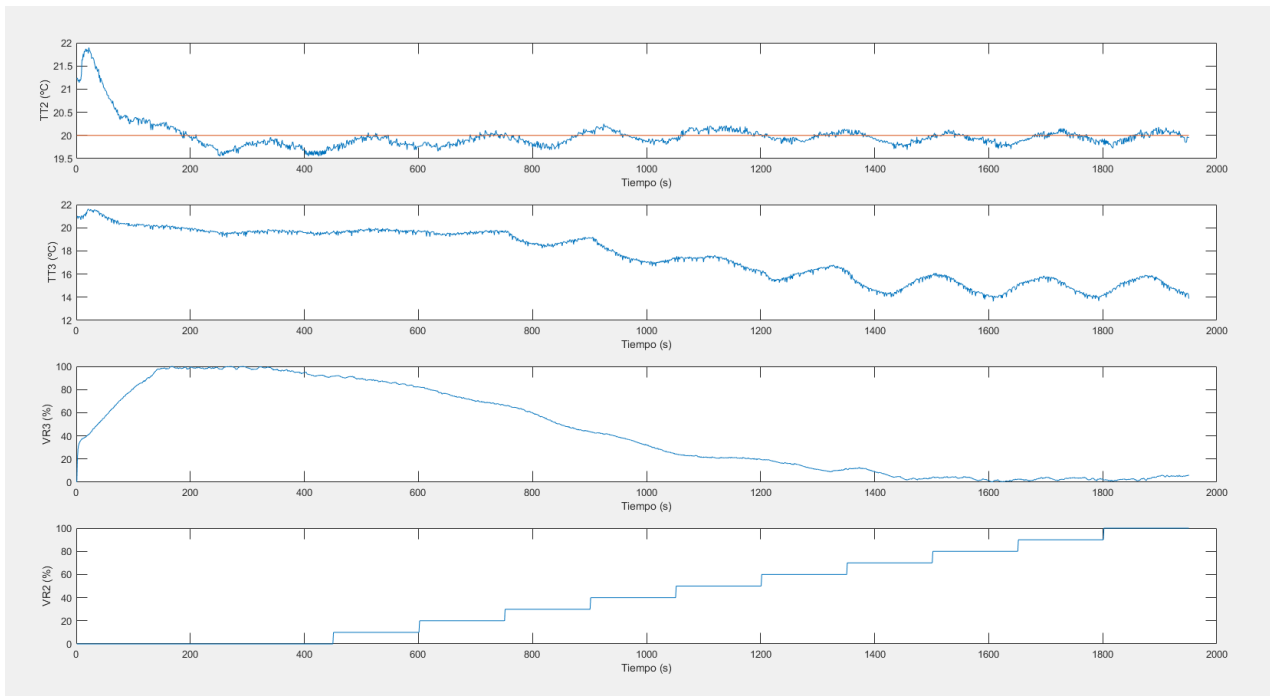


Figura 3.24 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ °C}$ y $VR1=66\%$.

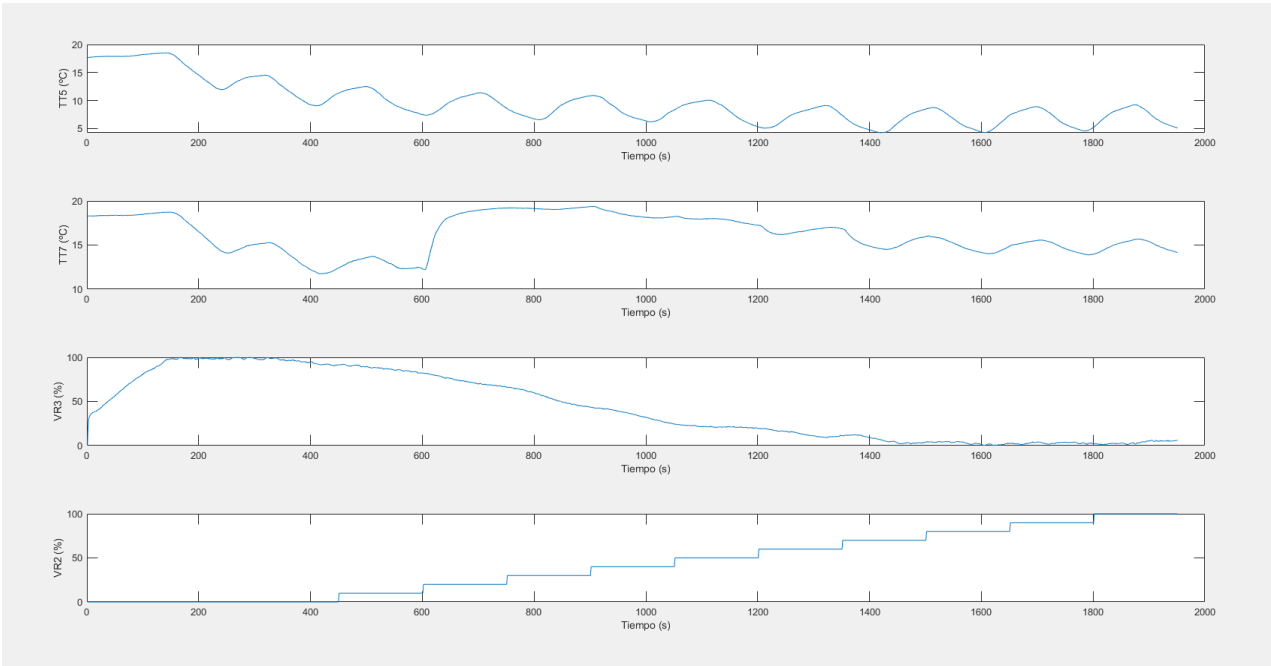


Figura 3.25 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=66\%$.

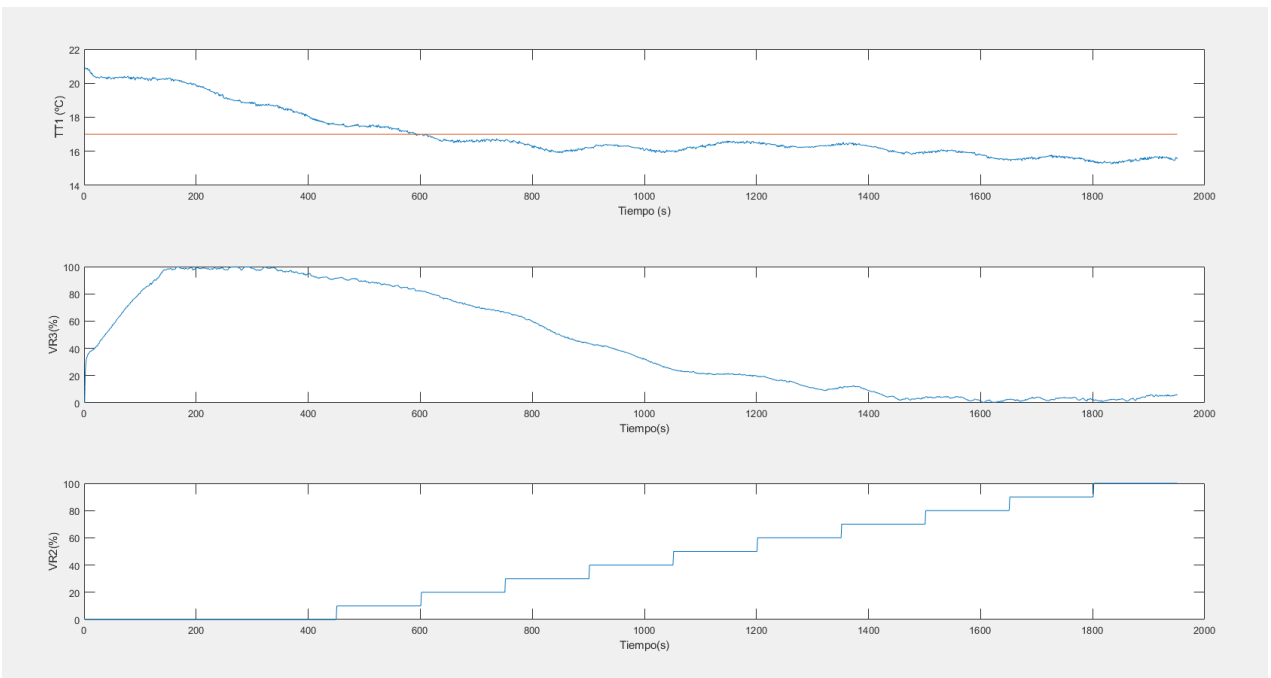


Figura 3.26 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=66\%$.

Referencia de TT2 = 23 °C, referencia de TT1 = 17 °C, VR1 = 66%

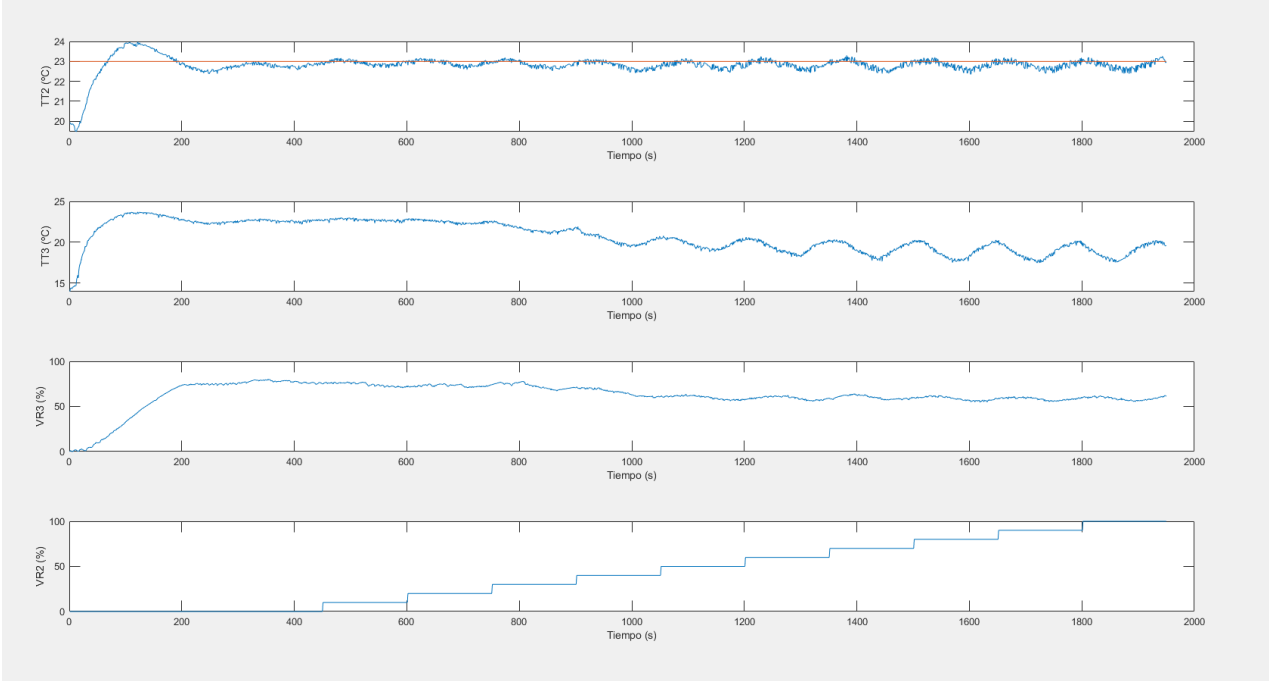


Figura 3.27 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=66%.

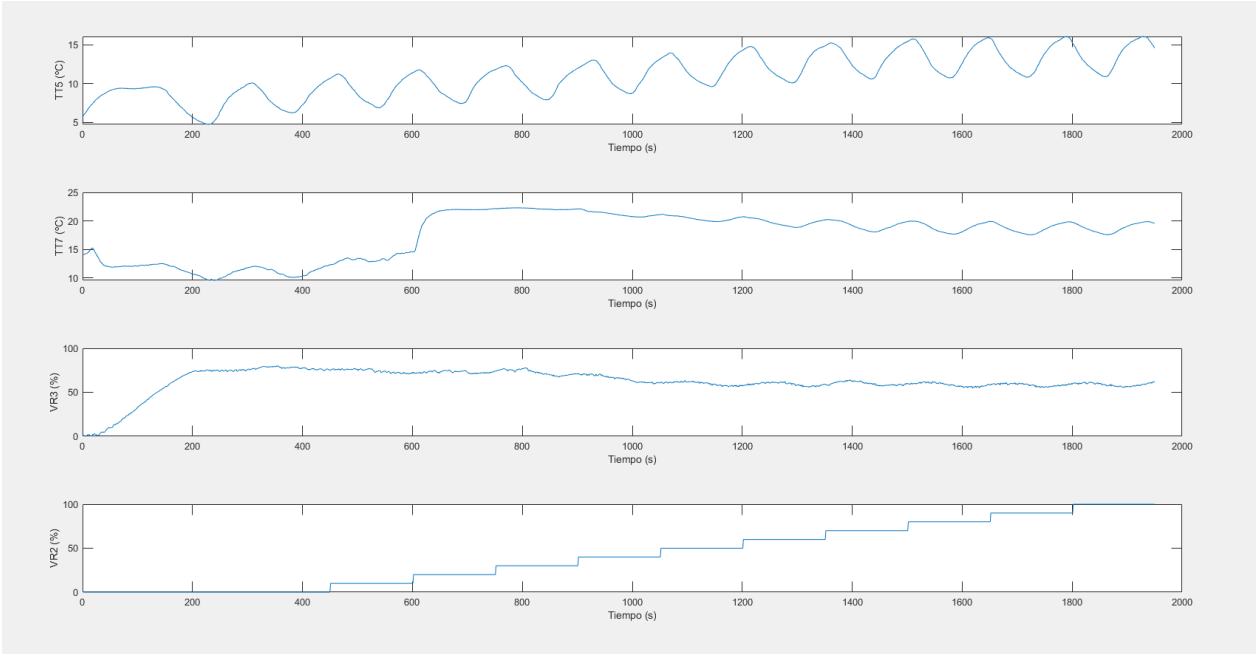


Figura 3.28 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con TT2=23 °C y VR1=66%.

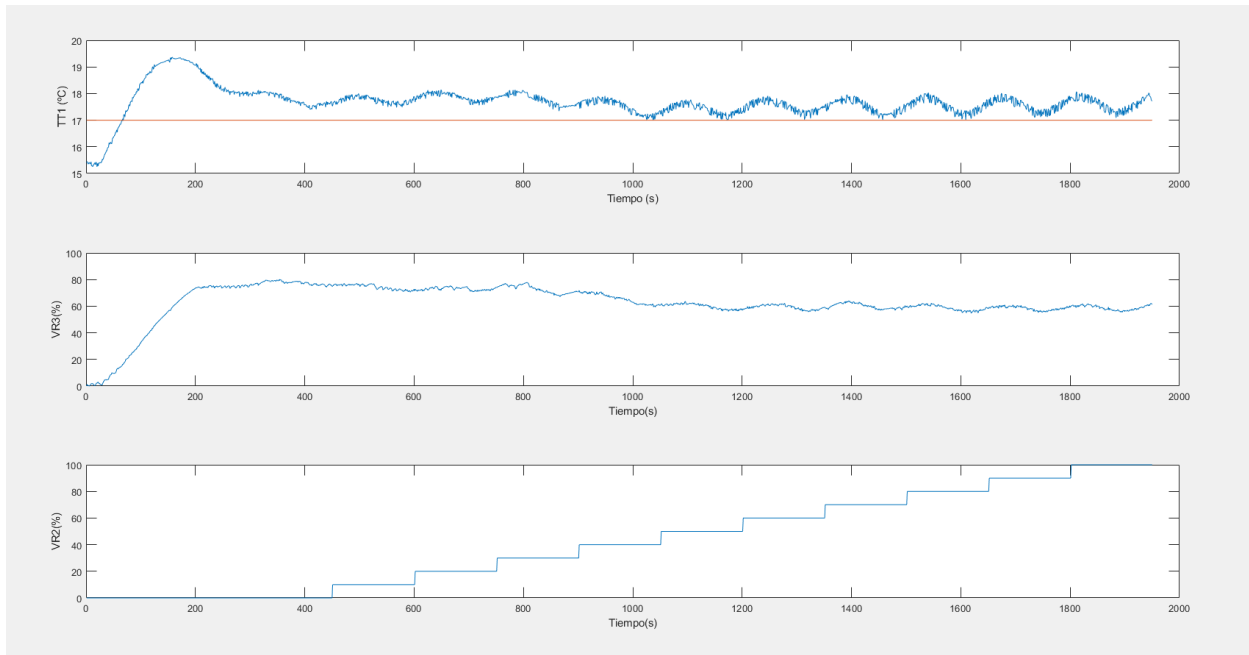


Figura 3.29 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=23\text{ °C}$ y $VR1=66\%$.

Referencia de $TT2 = 26\text{ °C}$, referencia de $TT1 = 21\text{ °C}$, $VR1 = 66\%$

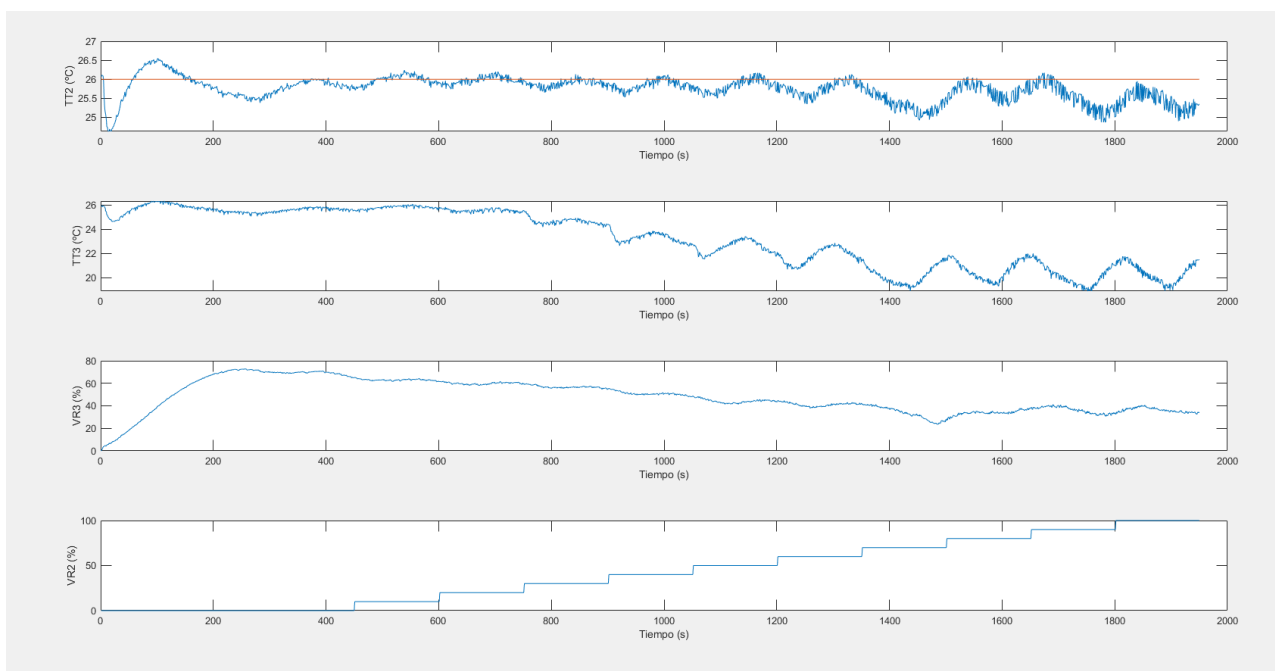


Figura 3.30 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ °C}$ y $VR1=66\%$.

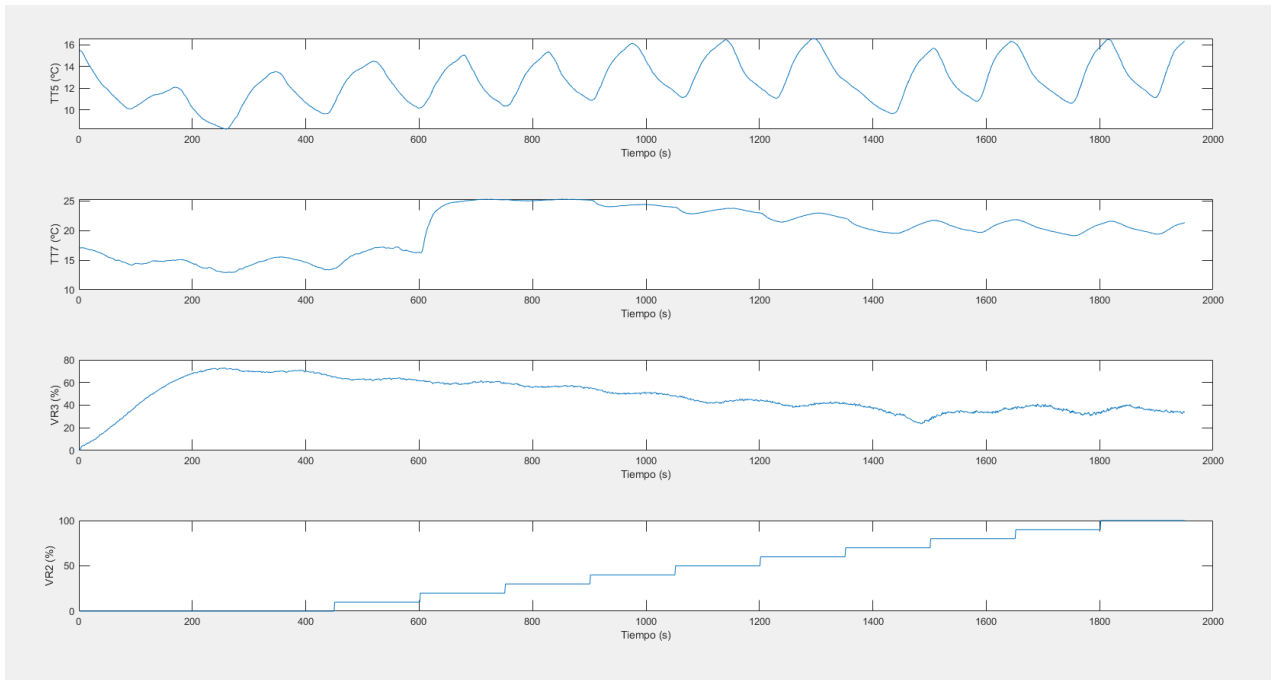


Figura 3.31 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=66\%$.

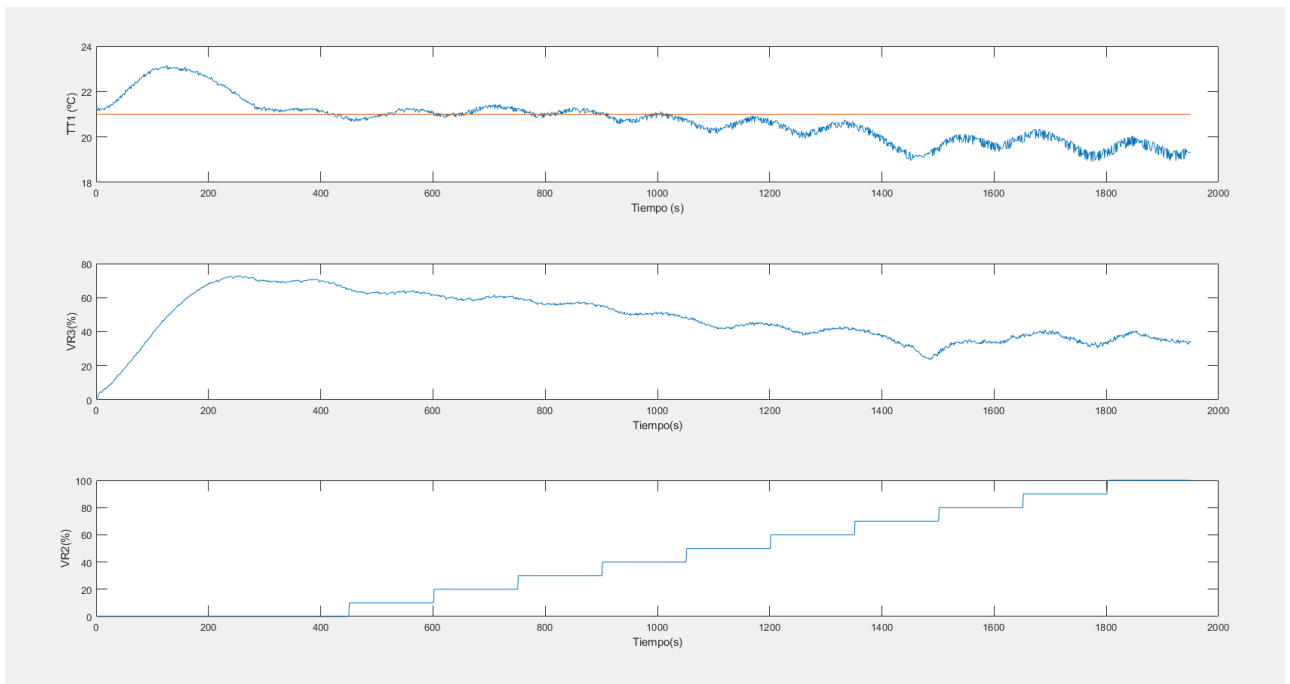


Figura 3.32 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=66\%$.

Referencia de $TT2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, referencia de $TT1 = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $VR1 = 100\%$

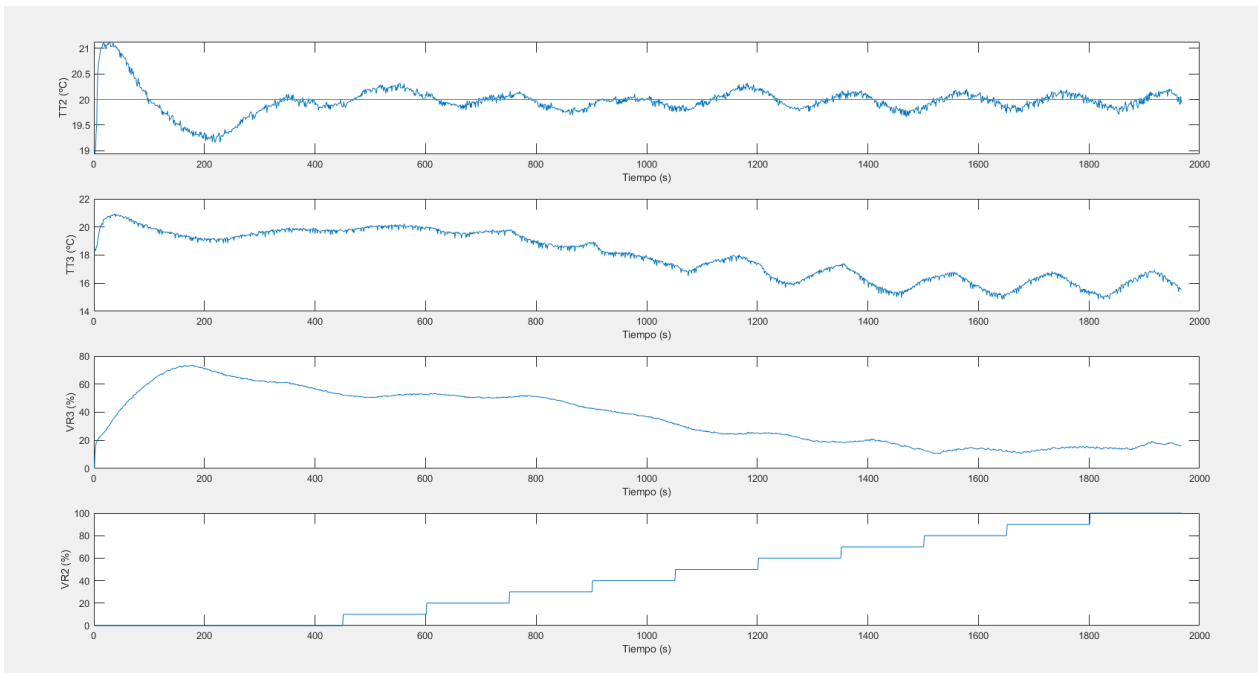


Figura 3.33 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

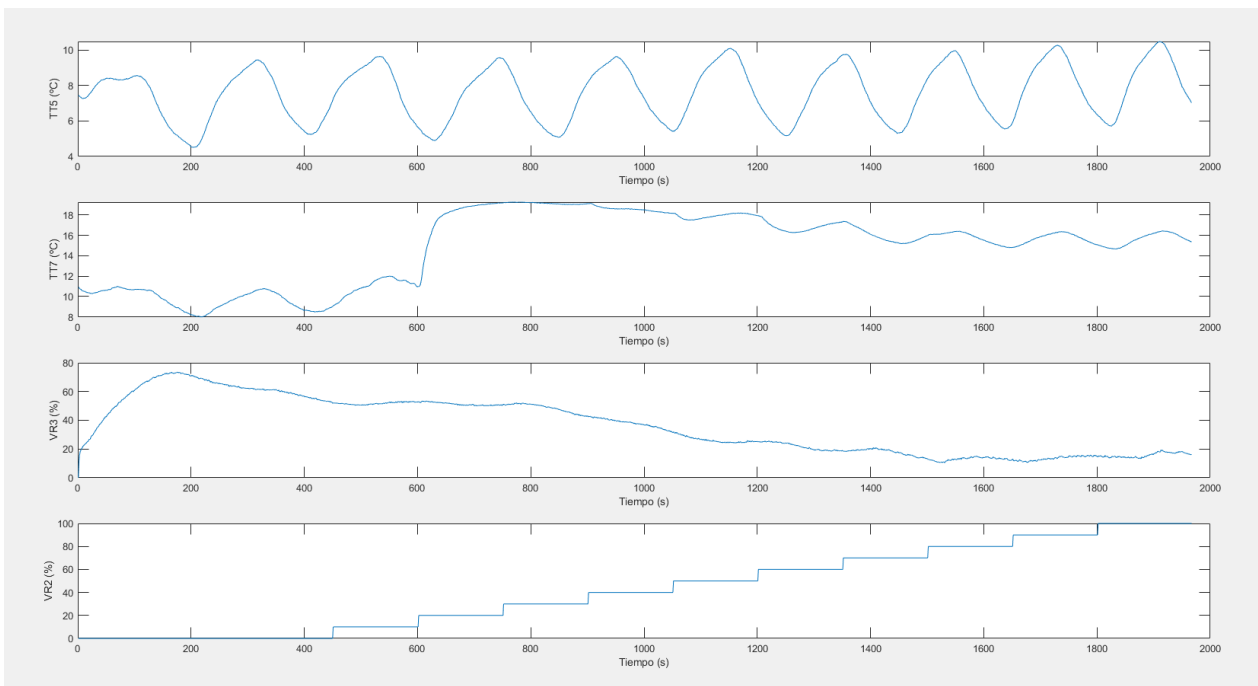


Figura 3.34 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

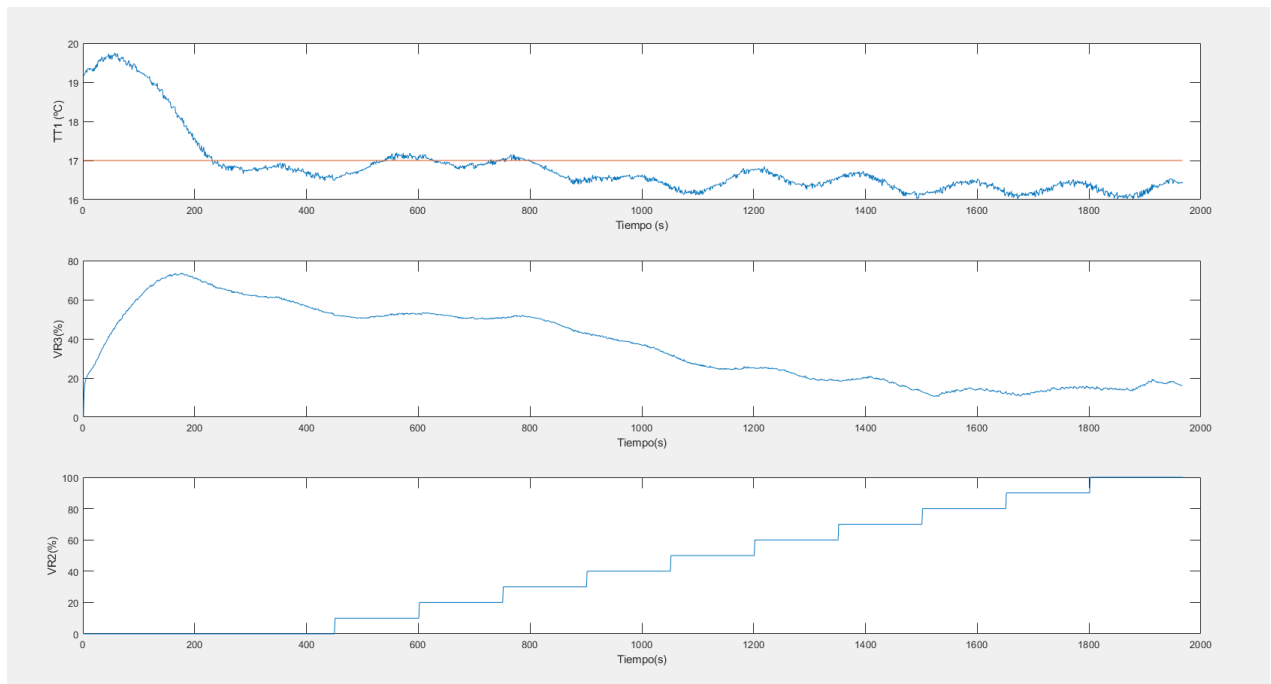


Figura 3.35 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT_2=20\text{ °C}$ y $VR_1=100\%$.

Referencia de $TT_2 = 23\text{ °C}$, referencia de $TT_1 = 19\text{ °C}$, $VR_1 = 100\%$

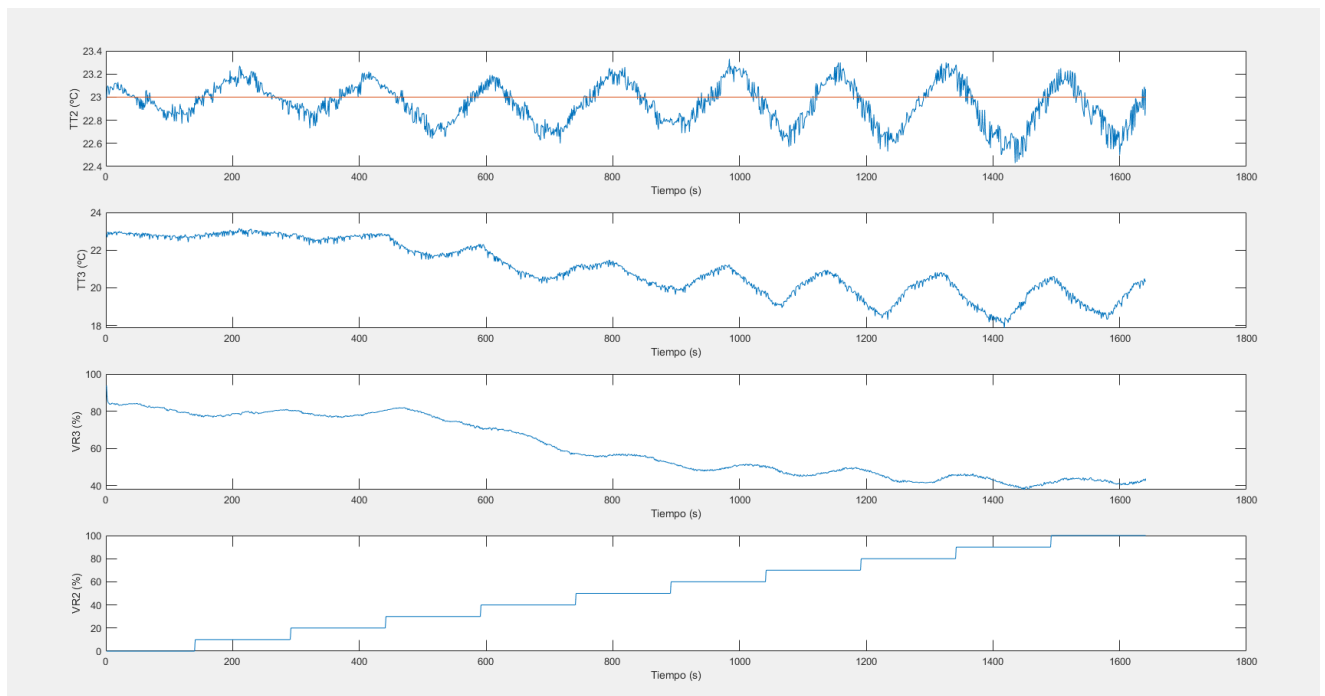


Figura 3.36 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT_2=23\text{ °C}$ y $VR_1=100\%$.

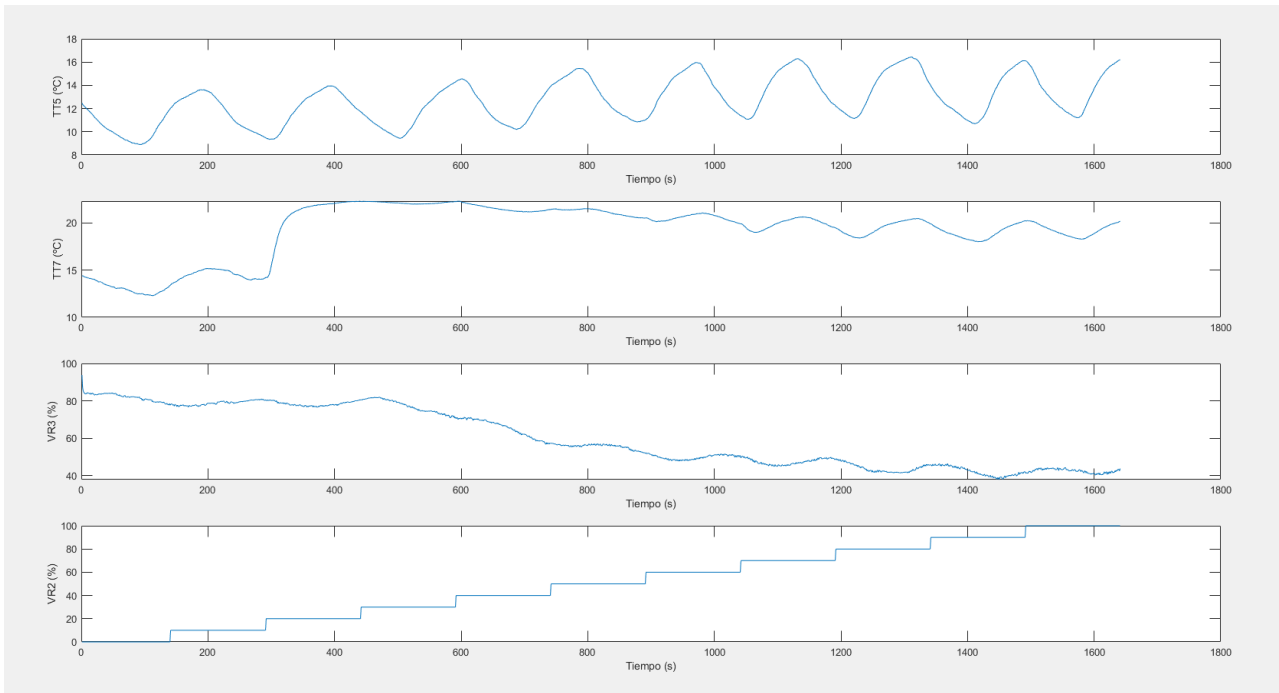


Figura 3.37 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

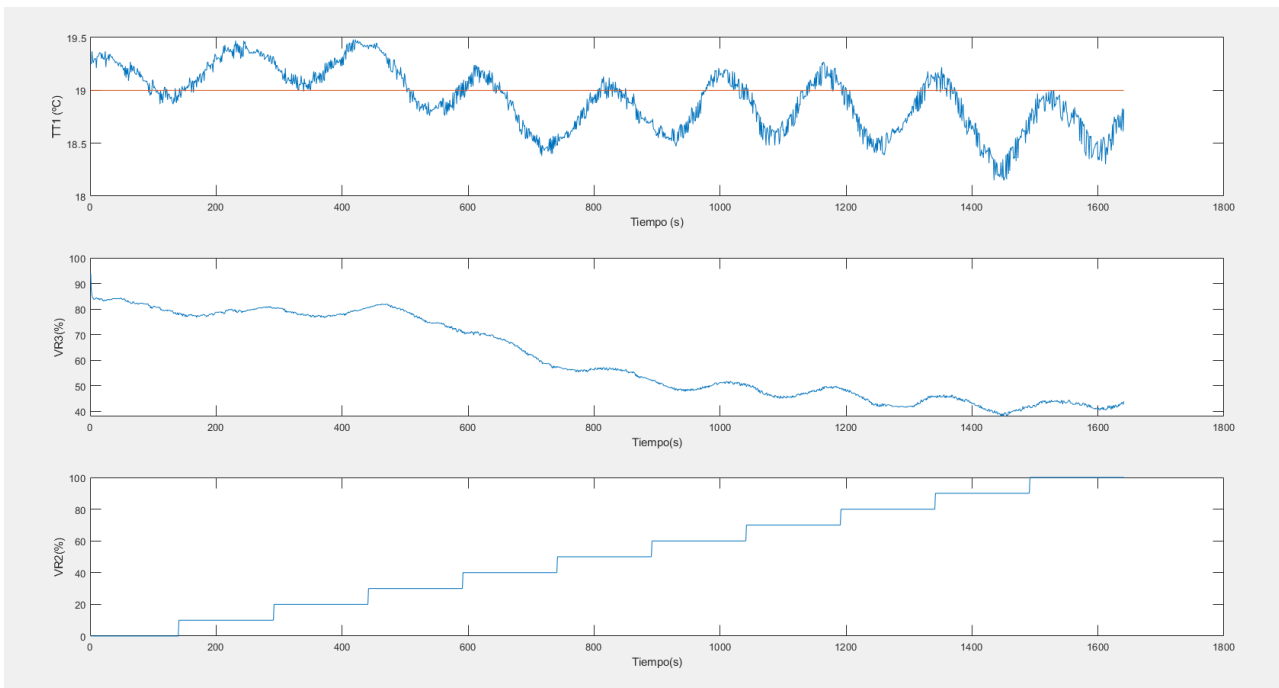


Figura 3.38 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

Referencia de $TT2 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, referencia de $TT1 = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $VR1 = 100\%$

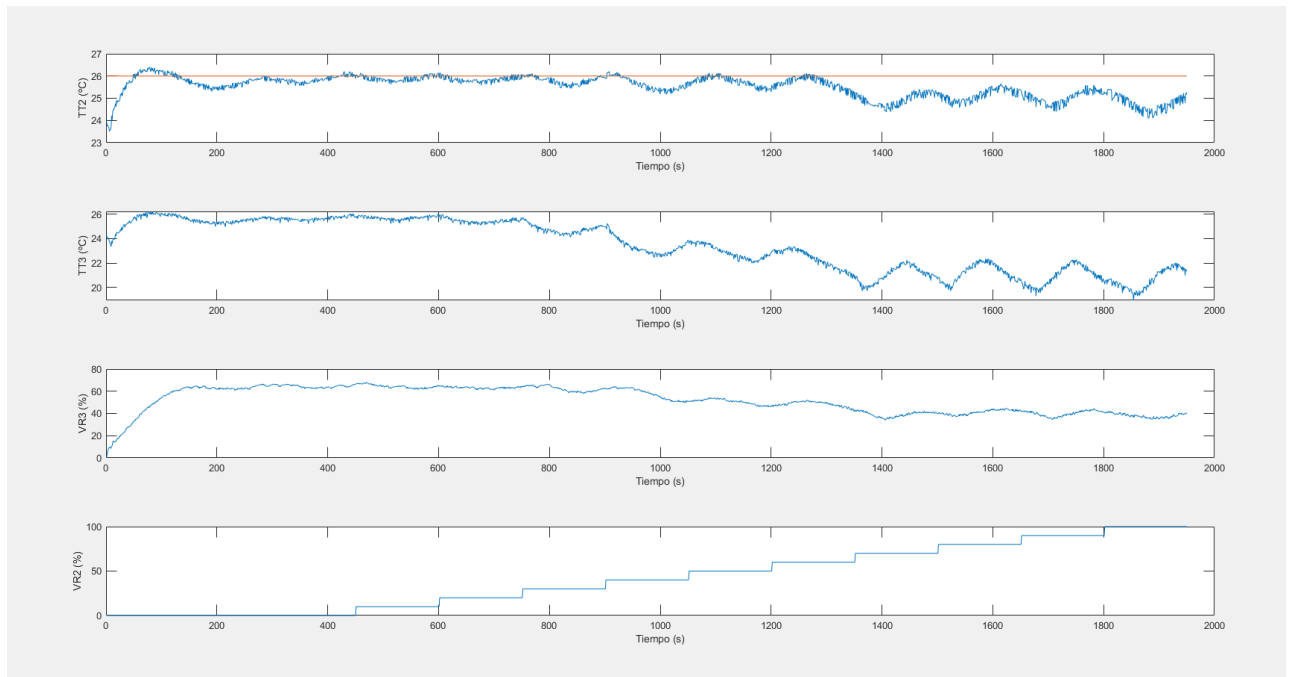


Figura 3.39 – Gráfica 1 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

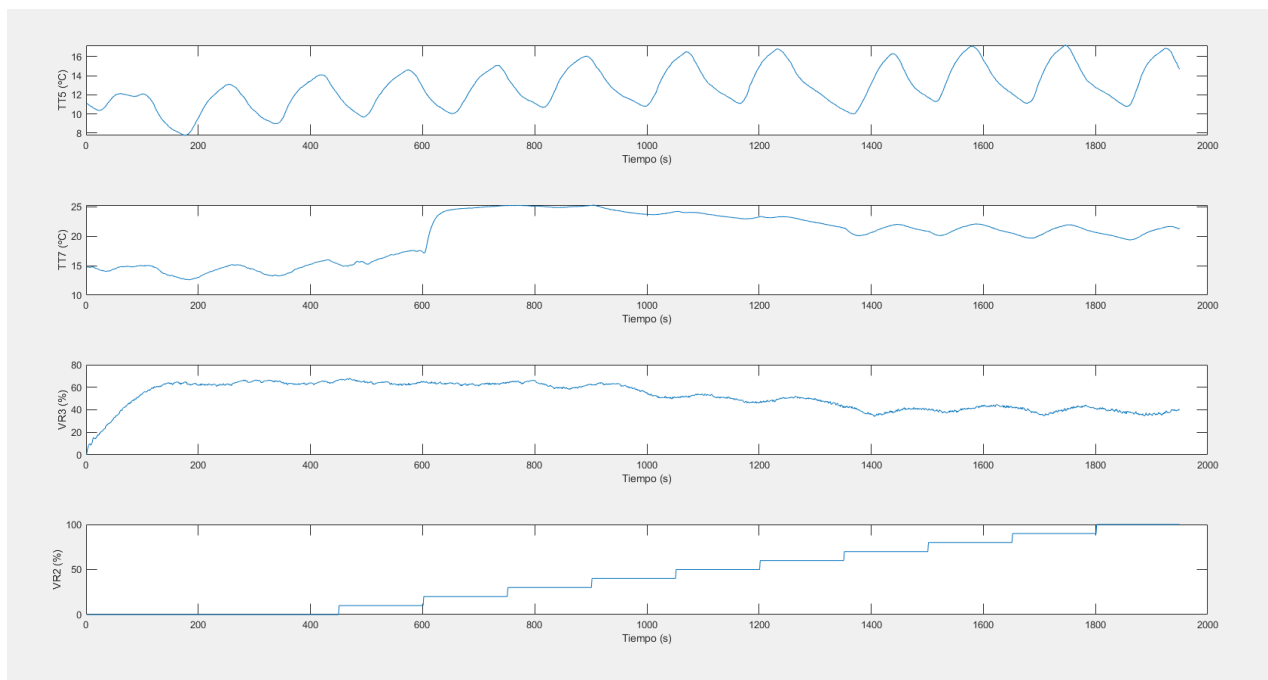


Figura 3.40 – Gráfica 2 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

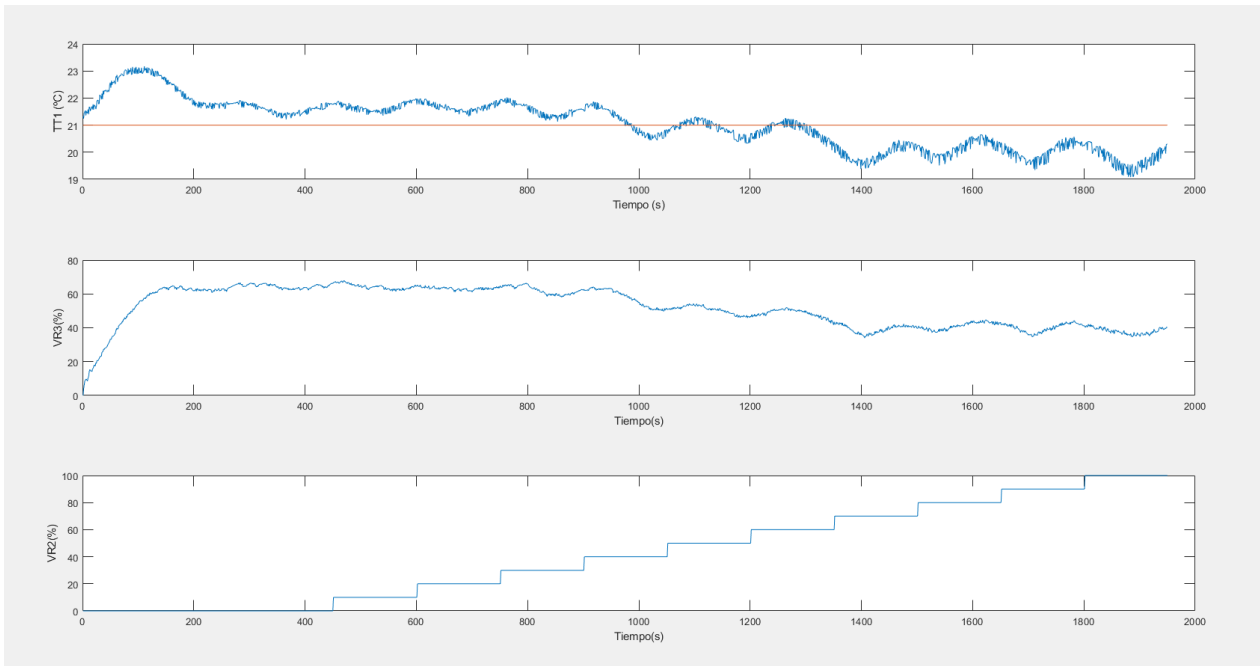


Figura 3.41 – Gráfica 3 del ensayo para caracterización del intercambiador de calor con $TT2=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1=100\%$.

En base a estos resultados, las primeras conclusiones que se sacan del funcionamiento del intercambiador de calor son las siguientes:

- 1) En primer lugar, como era de esperar, al **aumentar el valor de VR2, disminuye el valor de TT3**. Esto es lógico: para una temperatura $TT2$ de entrada al intercambiador de calor constante, cuanto más agua fría se introduzca en el intercambiador de calor, menor será la temperatura de salida, $TT3$.
- 2) **Para valores bajos de VR2 (entre el 0 y el 20%), al aumentar VR2 también lo hace TT7**, lo cual podría parecer contrario a la lógica ya que, a mayor volumen de agua fría, menor debería de ser el gradiente de temperatura en $TT7$. De hecho, para el escalón del 10% al 20% de $VR2$, se registra un cambio importante en $TT7$ en todos los ensayos.

La causa de esto es que, al estar la planta de frío aguas arriba del intercambiador de calor, **valores pequeños de VR2 no generan la suficiente diferencia de presión** como para que el agua atraviese el intercambiador de calor como se espera y la medida de $TT7$ no es la temperatura real del agua. De ahí que, una vez que se alcanza un valor suficientemente grande de $VR2$, a partir del 20%, se registre un cambio positivo bastante grande en la temperatura $TT7$.

- 3) **Una vez que $VR2 = 20\%$** , para el resto de escalones, el resultado es el esperado, **a mayor valor de VR2, que se corresponde con un mayor volumen de agua de la planta de frío introducido en el intercambiador de calor, menor será la temperatura TT7**, ya que se verá menos afectada por el otro caudal de agua con temperatura $TT2$.
- 4) Por otro lado, se puede observar con claridad el efecto que tiene $VR1$ en la acción del intercambiador de calor y también en la temperatura $TT2$: **cuanto mayor es VR1, mayores son las oscilaciones que se registran en las temperaturas a controlar ($TT1$ y $TT2$)**.
- 5) Por último, también se puede comprobar el efecto de la propia referencia que se da para $TT2$ en las temperaturas que afecta o que controla el intercambiador de calor: **la temperatura media de entrada al intercambiador de calor ($TT5$) aumenta conforme aumenta $TT2$, así como también lo hacen $TT3$ y $TT7$** .

Cabe comentar que, aunque el control de $TT2$ se realiza bien y se consigue mantener la temperatura en la referencia en todos prácticamente todos los ensayos, el control de $TT1$ ha sido más difícil de realizar y no siempre se ha podido mantener la temperatura en la referencia. No obstante, desde un principio $TT1$ se fija con el objetivo

de mantener la planta funcionando en torno a un punto de funcionamiento, de manera que mediante las resistencias se pueda llevar TT2 a la referencia y que el intercambiador de calor funcione siempre con, aproximadamente, la misma temperatura de entrada (aunque haya pequeñas oscilaciones con respecto a la referencia), cosa que se ha conseguido.

Una vez que se han obtenido los resultados, se puede pasar al desarrollo de las mallas de puntos y de la identificación de TT3 frente a las oscilaciones de TT5, como ya se había mencionado con anterioridad.

3.2.2.1. Caracterización del intercambiador de calor: TT3 en función de TT2 y VR2, para cada uno de los valores de VR1

Durante los ensayos realizados, se han obtenido una serie de valores de TT3 de salida del primer intercambiador de calor que se corresponden con unos valores de la temperatura de entrada TT2, una apertura determinada de la válvula VR2 y un valor de VR1. De esta forma, si se fija la variable VR1 como parámetro, se podrían obtener curvas que relacionen los valores de TT2, VR2 y TT3 según el valor que se fije de VR1.

El objetivo de este apartado es ese precisamente: obtener a partir de esta malla de puntos la relación matemática que existe entre las tres variables en cuestión, siendo VR1 constante.

Para la obtención de estas mallas de puntos, se han utilizado los valores de TT2 y VR2 utilizados durante los ensayos, así como los valores de TT3 que resultaban de los mismos, para cada una de las tres aperturas de VR1 con las que se ha trabajado (33%, 66% y 100%), de manera que para cada uno de los valores de VR1 se han definido tres vectores x, y, z, cada uno de los cuales contiene los valores de cada una de las variables.

Las tablas de valores que se obtienen a partir de los ensayos son las siguientes:

Tabla de valores de TT3 para VR1=33%

		TT2		
		20	23	26
VR1	0	19.87	22.7	25.8
	10	19.82	22.74	25.82
	20	19.33	22.05	25.11
	30	18.03	20.93	22.48
	40	15.29	18.73	19.44
	50	15.27	16.23	19.77
	60	13.26	15.28	17.35
	70	12.75	15.26	17.79
	80	12.96	15.37	17.03
	90	12.91	15.49	16.98
	100	13	15.6	17

Tabla 3.1 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=33%.

Donde la unidad de VR1 es % de la apertura de la válvula, y las unidades de TT2 y TT3 son °C.

Tabla de valores de TT3 para VR1=66%

		TT2		
		20	23	26
VR1	0	19.84	22.71	25.36
	10	19.87	22.76	25.91
	20	19.65	22.39	25.67
	30	18.43	21.15	24.61
	40	17.23	20.05	23.08
	50	16.69	19.78	22.06
	60	15.93	19	21.54
	70	14.88	19.04	20.5
	80	14.77	18.82	20.57
	90	14.82	19	19.97
	100	14.74	18.69	20.63

Tabla 3.2 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=66%.

Tabla de valores de TT3 para VR1=100%

		TT2		
		20	23	26
VR1	0	19.56	22.63	25.6
	10	20.02	22.75	25.53
	20	19.69	22.88	25.33
	30	18.68	21.85	24.49
	40	17.53	20.71	22.99
	50	17.5	20.44	22.58
	60	16.59	20.45	21.54
	70	16.11	19.91	20.9
	80	15.73	19.72	20.76
	90	15.71	19.27	20.76
	100	15.9	19.41	20.9

Tabla 3.3 – Tabla de valores de TT3 en función de VR2 y TT2 para VR1=100%.

Una vez obtenidos todos los puntos, mediante la herramienta “Curve Fitting Tool” de Matlab, se puede obtener una representación de dicha malla de puntos. Esta herramienta permite obtener una curva a partir de los vectores que forman los valores de TT2, TT3 y VR3 y del tipo de curva que se especifique. En este caso, las curvas que se han buscado han sido polinomios con de grado en x (TT2) y de grado 3 en y (VR2).

A continuación, se presentan las tres mallas de puntos obtenidas para cada uno de los valores del parámetro VR1:

VR1 = 33%

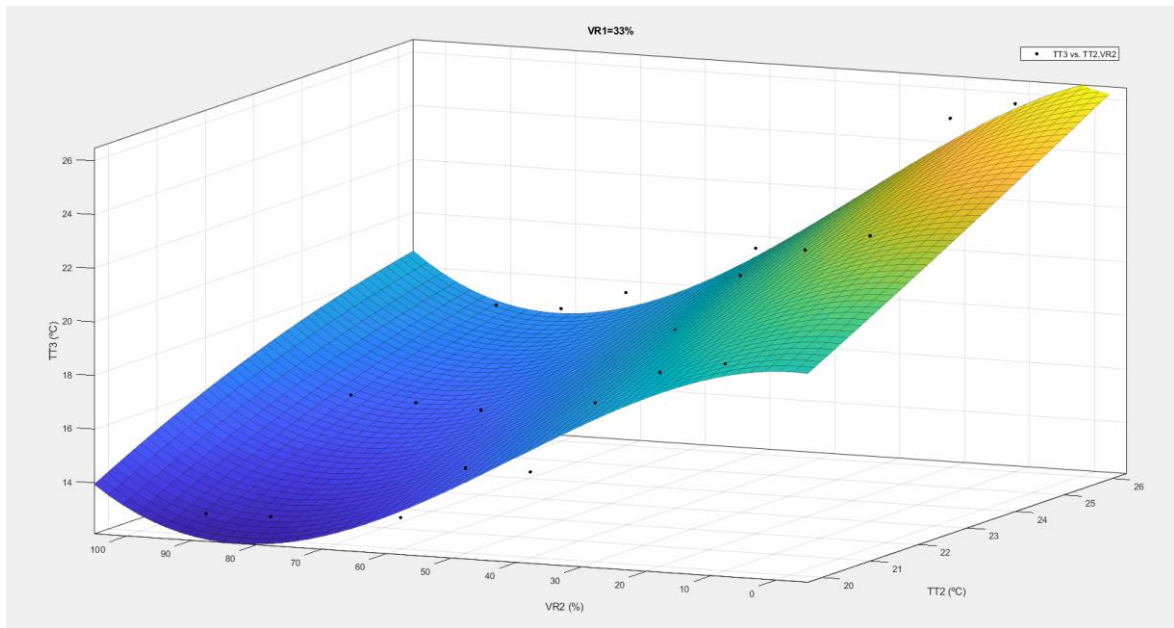


Figura 3.42 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=33%.

La ecuación del polinomio generado a partir de esta malla de puntos es la siguiente:

$$f(x, y) = 3.336 + 0.7057x - 0.1276y + 0.006818x^2 + 0.01568xy - 0.003897y^2 - 0.0005101x^2y + 4.549 \cdot 10^{-5}xy^2 + 2.496 \cdot 10^{-5}y^3$$

Donde $x = TT2$, $y = VR2$ y $z = f(x, y) = TT3$.

VR1 = 66%

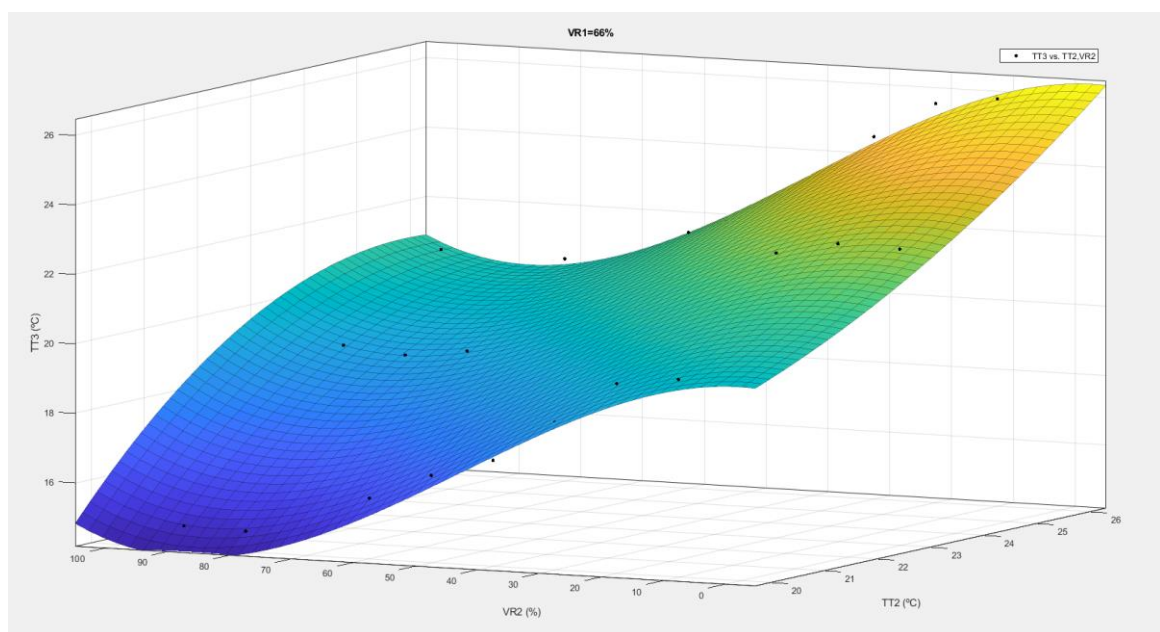


Figura 3.43 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=66%.

Donde la ecuación del polinomio generado ha sido el siguiente:

$$f(x, y) = 25.31 - 1.216x - 1.023y + 0.04775x^2 + 0.0902xy - 0.002016y^2 - 0.001968x^2y - 2.273 \cdot 10^{-6}xy^2 + 1.62 \cdot 10^{-5}y^3$$

VR1 = 100%

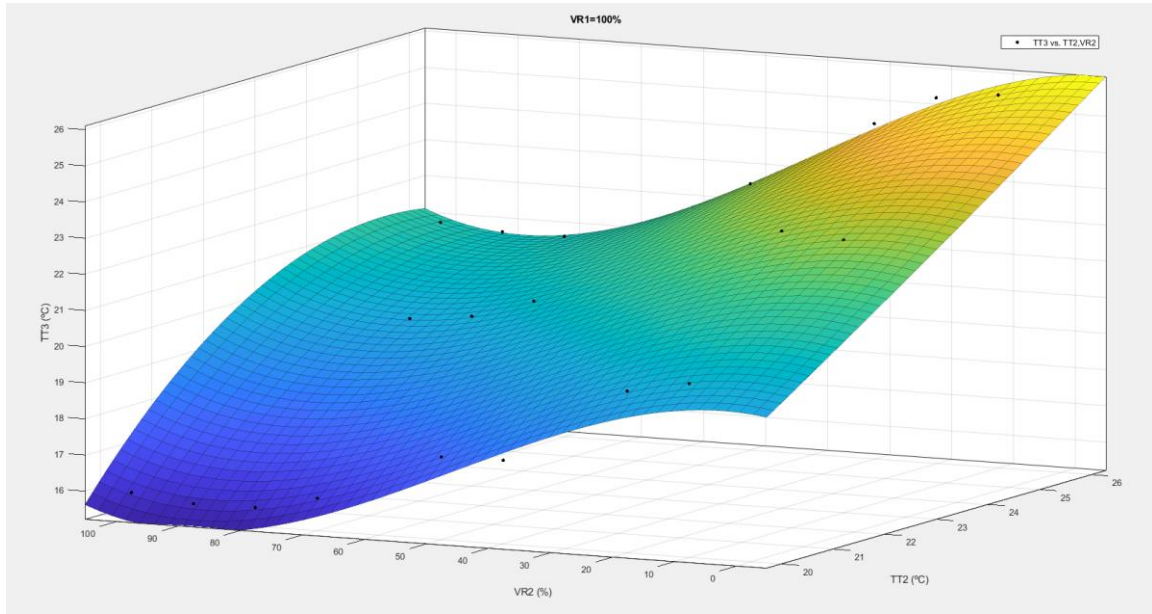


Figura 3.44 – Malla de puntos generada a partir de los resultados de la caracterización para VR1=100%.

Donde la ecuación que define el polinomio es la siguiente:

$$f(x, y) = -0.4108 + 1.017x - 0.7343y - 0.0003535x^2 + 0.06863xy - 0.002229y^2 - 0.001573x^2y + 1.981 \cdot 10^{-5}xy^2 + 1.35 \cdot 10^{-5}y^3$$

Observando estos resultados, además de comprobarse más claramente las conclusiones que se sacaron antes, también se pueden apreciar algunas cosas más:

- Por un lado, **cuanto menor es VR1** y, por tanto, menor es el caudal impulsado, **la relación entre TT3 y TT2 parece ser más lineal** (si se presta atención al corte de la malla de puntos con el plano formado por los ejes de estas dos temperaturas).
- Por otro lado, las diferencias entre la forma de la representación del polinomio calculado para VR1=33% y las de los polinomios de VR1=66% y VR1=100% son mucho mayores que entre estos dos, lo cual se puede interpretar como que **la relación entre TT2, TT3 y VR2 cambia bastante para valores bajos de VR1**.

Con esto, se pasa ahora al último apartado de la caracterización del intercambiador de calor: la identificación del efecto que tienen las oscilaciones de la temperatura TT5 en la temperatura TT3 del agua impulsada durante su paso por el intercambiador de calor.

3.2.2.2. Efecto de las oscilaciones de TT5 en la temperatura TT3

Para la identificación de este efecto se van a utilizar los resultados del ensayo con $TT2 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VR1 = 33\%$, ya que se corresponden con una condiciones de funcionamiento de la planta bastante habituales y así se evita obtener la ganancia que relaciona las oscilaciones de TT5 y TT3 en condiciones límite de la planta, en las que los resultados podrían variar.

Se ha observado que las oscilaciones que se producen en TT5 producen un mayor efecto cuanto menor es TT3, es decir, cuanto mayor sea la acción de las válvulas VR2 y VR3. Observando los últimos escalones realizados en VR2 para cualquiera de los ensayos anteriores, esto se puede apreciar con facilidad:

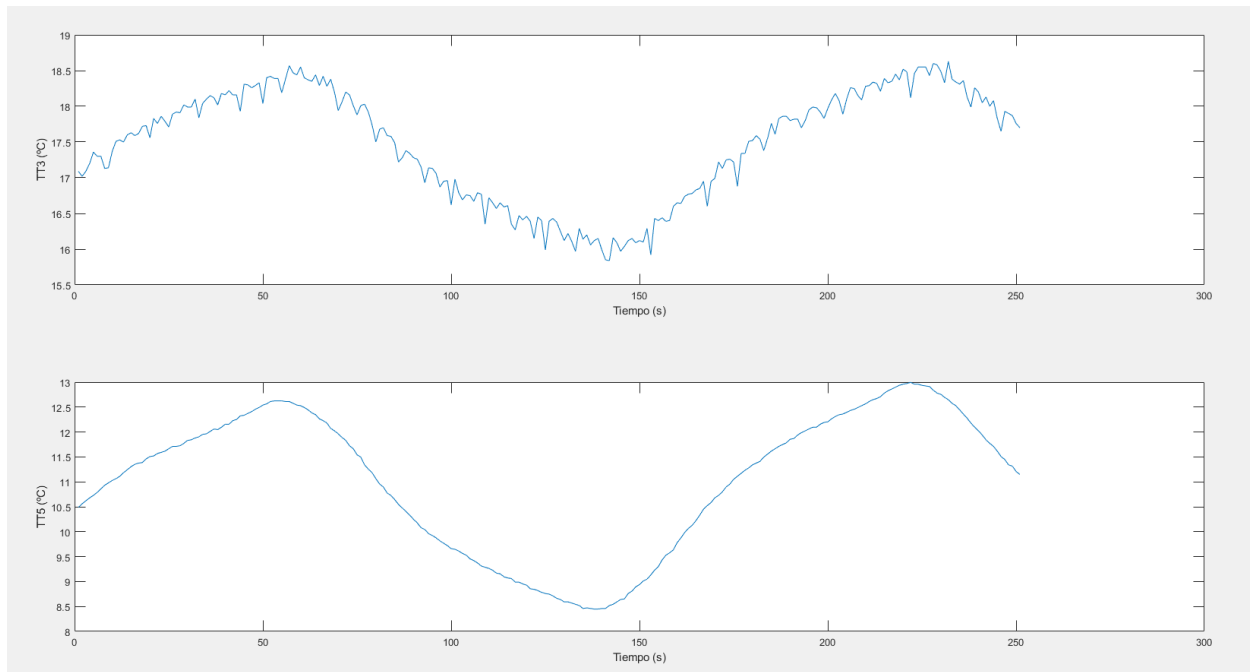


Figura 3.45 – Efecto de las oscilaciones de la temperatura TT5 en TT3.

De esta manera, calcular la ganancia que relaciona las oscilaciones de TT5 con las que se producen en TT3 es simple, sólo se tiene que dividir la amplitud pico a pico de dichas oscilaciones en TT3 entre las de TT5:

$$K_{osc} = \frac{18.6 - 15.84}{13 - 8.46} = 0.608$$

Así, por cada 1 °C que se desvíe TT5 de su valor medio, TT3 lo hará en 0.608 °C.

Con esto concluye la caracterización del intercambiador de calor y, con ello, la primera parte de identificación estática de la planta multiprocesos de este Trabajo de Fin de Grado. A continuación, se pasará a la segunda parte del trabajo, en la cual se realizará una identificación dinámica de los distintos procesos de la planta que son objeto de estudio.

4 IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA PLANTA MULTIPROCESOS EN LA CONFIGURACIÓN 2

El objetivo de esta segunda parte del Trabajo de Fin de Grado es el de, a partir de los resultados obtenidos mediante distintos ensayos chirp para cada una de las variables de actuación de la planta multiprocesos en la configuración 2, obtener modelos cuyas respuestas frecuenciales se aproximen lo más posibles a los sistemas reales que componen esta configuración.

Para la realización de estos ensayos chirp, al igual que ya ocurría en la primera parte de identificación estática de la planta, se han utilizado distintos modelos de Matlab-Simulink, en los cuales se han configurado las señales chirp que se corresponden a cada una de las variables de actuación (VR1, VR2, VR3 y las dos resistencias, R1 y R2), y donde se han registrado los datos obtenidos en las variables a medir (principalmente las temperaturas TT2 y TT9).

Por otro lado, el procesamiento de los resultados obtenidos, así como la propia obtención de los modelos que relacionan las entradas del sistema con las salidas, se han realizado a través de la Toolbox de identificación de sistemas de Matlab.

Las señales chirp de cada ensayo han sido elegidas de la siguiente forma:

- En primer lugar, la frecuencia mínima de la señal se elige en base a la constante de tiempo de cada sistema, las cuales se han obtenido durante los ensayos realizado en el primero apartado de este trabajo. La frecuencia mínima elegida en cada caso ha sido, aproximadamente, del orden de una década menor que la frecuencia que se corresponde con la constante de tiempo de cada uno de los sistemas. Por tanto, esta frecuencia mínima será:

$$\omega_{min} = \frac{1}{10\tau}$$

- Por otro lado, la frecuencia máxima va a estar siempre limitada al tiempo de muestreo del servidor OPC. El tiempo de muestreo con el que se comunican las entradas con el servidor OPC es $T_m = 1$ s. En un principio, se decidió elegir una frecuencia máxima correspondiente a 10 veces el tiempo de muestreo. No obstante, los resultados obtenidos mostraban que incluso esta frecuencia era demasiado grande, por lo que se decidió cambiarla a la correspondiente a 30 veces el tiempo de muestreo, de manera que la frecuencia máxima en todos los ensayos ha sido:

$$\omega_{max} = 2\pi f_{max} = 2\pi \frac{1}{30 * T_m} \approx 0.2 \text{ rad/s}$$

- En cuanto a la amplitud de la señal senoidal y su valor medio, estos han dependido de la señal de actuación. Estos valores se especificarán a continuación en cada uno de los ensayos individuales, así como el resto de condiciones de funcionamiento (es decir, las referencias fijadas en el resto de actuadores sobre los que no se está realizando cada ensayo).

Una vez establecidas las condiciones en las que se han basado los ensayos realizados, se da paso ahora a la muestra de los resultados obtenidos, así como los modelos que se derivan de dichos resultados.

4.1. Respuesta frecuencial de la planta frente a las resistencias R1 y R2

Como ya se había establecido antes, a lo largo de este trabajo, las variables R1 y R2 se van a tomar como una sola variable, siendo ambas siempre iguales entre sí y analizando su comportamiento como si se tratase de una única variable.

Para el ensayo mediante señal chirp realizado para las resistencias R1 y R2, las condiciones de funcionamiento que se han establecido han sido las siguientes:

$$VR2 = 30\%, \quad VR3 = 30\%, \quad VR1 = 30\%$$

La señal chirp que se corresponde con los valores que el duty cycle de R1 y R2 toman en cada momento, estará centrada en $R1=R2=50\%$, con una amplitud del 30%. Es decir, la señal chirp variará entre $R1_{\min}=R2_{\min}=20\%$ y $R1_{\max}=R2_{\max}=80\%$.

Por otro lado, en base a los resultados obtenidos en la primera parte de identificación estática de la planta, se puede obtener la frecuencia mínima de la señal chirp en función del valor de la constante de tiempo de R1 y R2 con respecto a TT2 o TT9:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{10\tau} \approx \frac{1}{150} = 0.00667 \text{ rad/s}$$

Además, como ya se estableció antes, la frecuencia máxima será:

$$\omega_{\max} = 0.2 \text{ rad/s}$$

En estas condiciones, los resultados obtenidos para el ensayo son los siguientes:

R1/R2 – TT9

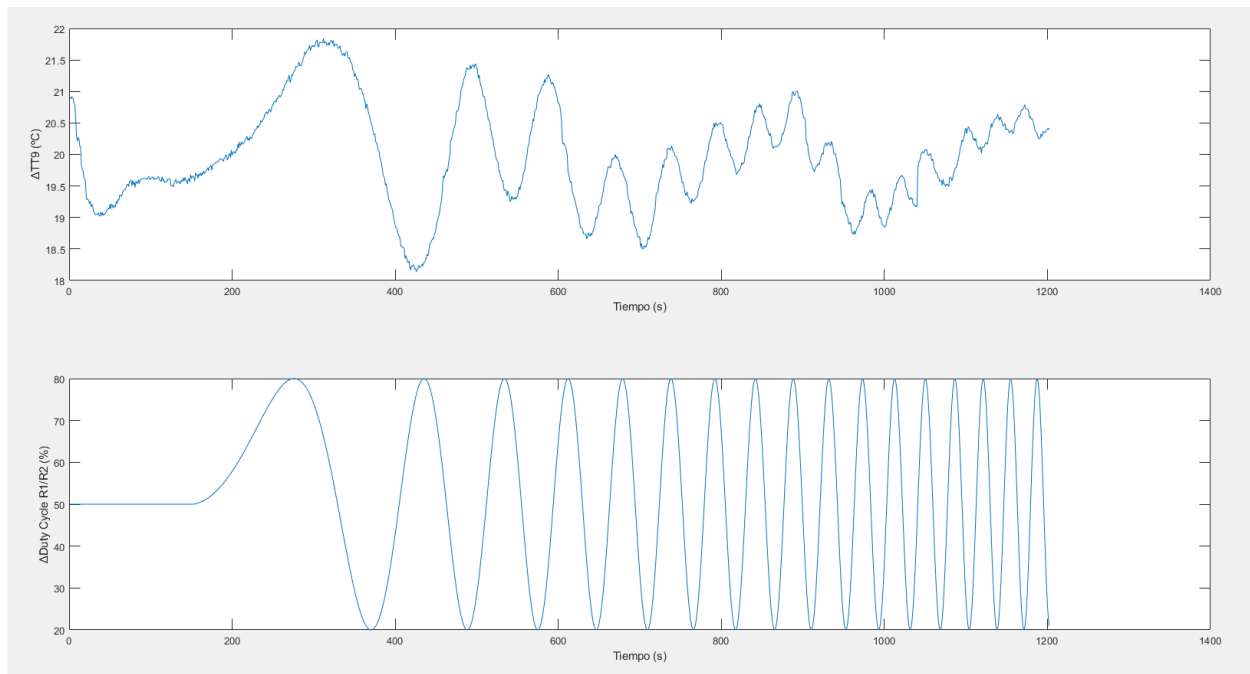


Figura 4.1 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en R1/R2.

Lo primero que se puede apreciar en los resultados es que, además de las oscilaciones que vienen dadas por la señal chirp introducida en las resistencias, también se observa otra oscilación más lenta. Esta oscilación es debida a un efecto que ya se había estudiado antes: las oscilaciones que se dan en la temperatura del agua proveniente de la planta de frío (TT5).

Por ello, los modelos que se han obtenido a partir de estos resultados se ha tomado esta temperatura TT5 como una entrada del sistema (aunque en realidad no lo sea, y simplemente sea un efecto de cómo funciona la planta de frío), con el objetivo de tener un modelo que sea lo más parecido al real y que, por tanto, también se vea afectado por estas oscilaciones.

Como ya se ha comentado, para la obtención de dichos modelos se ha utilizado la System Identification Toolbox de Matlab, que proporciona distintas herramientas ya sea para el procesamiento de los datos objetivos, la identificación de dichos modelos o la validación de los mismos.

Para la obtención del modelo, se han procesado previamente tanto las entradas de la planta (las resistencias y TT5) como la salida (TT9), para convertir las variables en incrementales y eliminar las tendencias y derivas que puedan existir en las mismas. Además, se han recortado las señales para excluir el periodo inicial en que R1 y R2 se mantiene constantes para llevar la planta al punto de operación deseado.

Para la eliminación de estas tendencias se ha utilizado la función “detrend” del Toolbox de Identificación, de manera que las señales de entrada y salida tras el procesamiento han sido las siguientes:

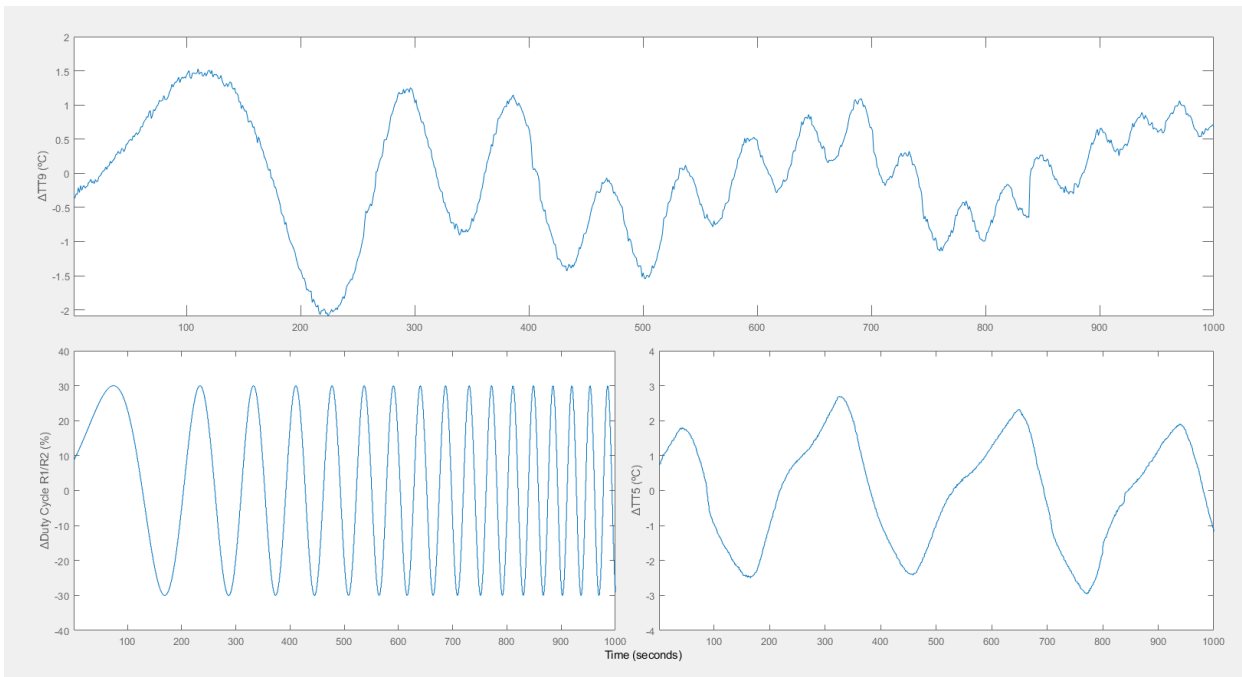


Figura 4.2 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en R1/R2.

Una vez procesados los datos, ya se pueden utilizar para calcular el modelo que se busca. En este caso, el modelo que se ha obtenido ha sido un modelo de Box-Jenkins, que viene representado por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t)$$

Para la obtención de este modelo, se hace uso de la función “bj” de Matlab, que permite estimar dicho modelo a partir de los datos de entrada y salida de los que se dispone y de una serie de parámetros del modelo que son:

- nb: grado del polinomio B + 1 (matriz de dimensiones Ny por Nu).
- nf: grado del polinomio F (matriz de dimensiones Ny por Nu).

- nc: grado del polinomio C (vector de longitud Ny).
- nd: grado del polinomio D (vector de longitud Ny).
- nk: retraso de la actuación (matriz de dimensiones Ny por Nu).

Donde Ny es el número de salidas y Nu el número de entradas.

Los parámetros que se han elegido son los siguientes:

$$nb = [2 \ 2], \quad nf = [3 \ 3], \quad nc = 3, \quad nd = 3, \quad nk = [32 \ 30]$$

Estos parámetros, salvo nk, han sido elegidos mediante prueba y error hasta que se han conseguido unos resultados suficientemente buenos. Por otro lado, nk ha sido elegido en base al retraso que se ha medido en TT9 con respecto a la actuación en las resistencias (primera componente) y con respecto a las oscilaciones en TT5 (segunda componente).

Así, el modelo de Box-Jenkins que se ha obtenido ha sido el siguiente:

$$y(t) = \frac{-0.000269 z^2 - 32 + 0.0004815 z^2 - 33}{1 - 1.801 z^{-1} + 0.701 z^{-2} + 0.1036 z^{-3}} u_1(t) + \frac{0.005147 z^2 - 30 - 0.005145 z^2 - 31}{1 - 2.847 z^{-1} + 2.713 z^{-2} - 0.8663 z^{-3}} u_2(t) + \frac{1 - 2.116 z^{-1} + 1.374 z^{-2} - 0.2143 z^{-3}}{1 - 2.899 z^{-1} + 2.844 z^{-2} - 0.9436 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT9, $u_1(t)$ es la acción incremental de R1/R2, $u_2(t)$ es el gradiente de temperatura de TT5 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Por otro lado, la función “compare” de Matlab permite validar el modelo comparándolo con los resultados que se han obtenido. Utilizando dicha función con el modelo obtenido utilizando las mismas entradas (R1 y R2 y la temperatura TT5 que se mide), el resultado es el siguiente:

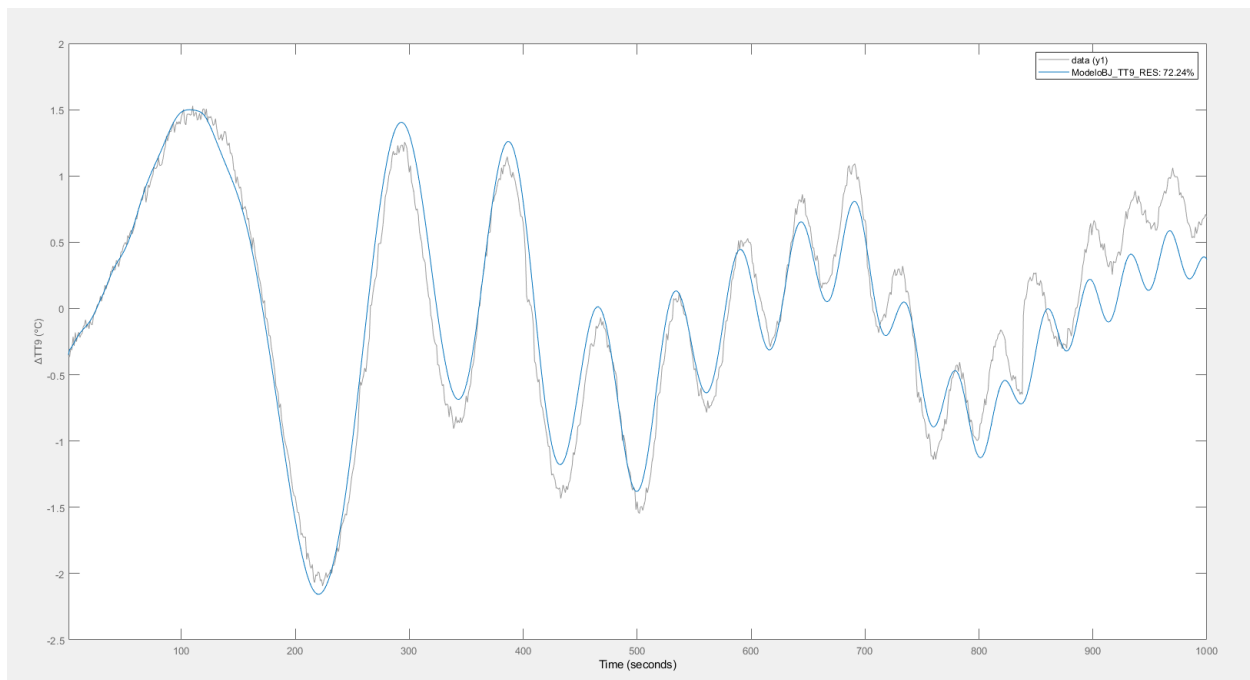


Figura 4.3 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a R1/R2.

Como se puede apreciar, el modelo es bastante próximo al real para las frecuencias más bajas, si bien hay algunas diferencias en frecuencias más altas en la parte que corresponde a las oscilaciones de TT5.

Se pasa ahora al estudio de la respuesta frecuencia de TT2 frente al mismo ensayo mediante señal chirp en las resistencias.

R1/R2 – TT2

Observando ahora TT2 en el mismo ensayo que se realizó antes, los resultados obtenidos son los siguientes:

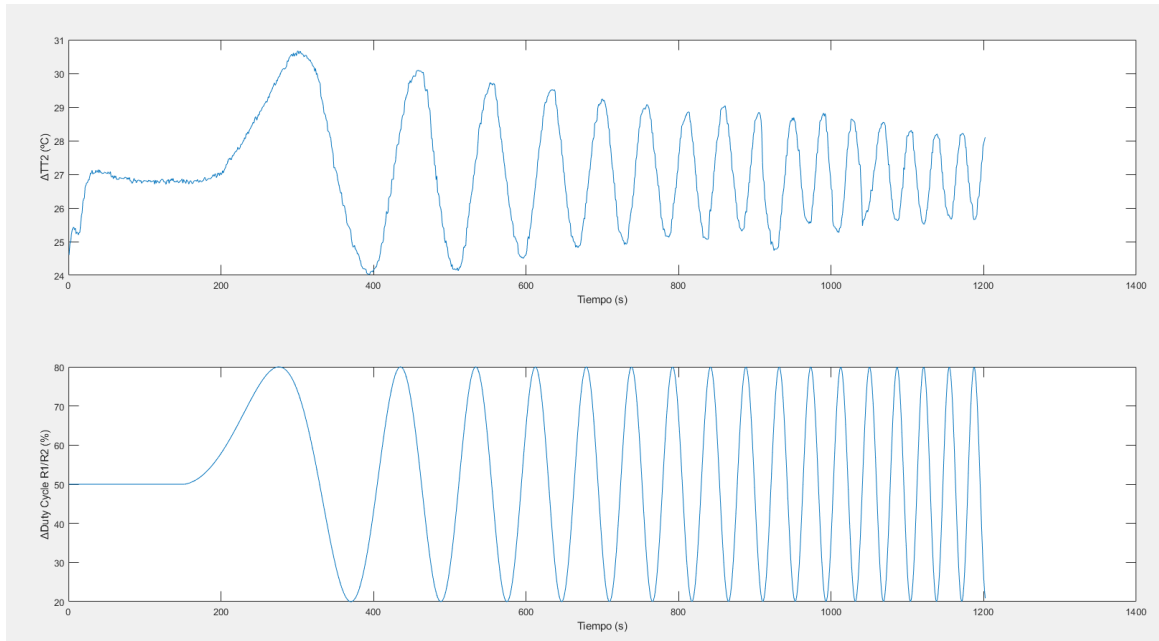


Figura 4.4 – Respuesta frecuencial de TT2 ante ensayo chirp en R1/R2.

Al contrario que ocurría para TT9, TT2 no se ve afectada por la temperatura TT5 del agua de la planta de frío. Por tanto, en este caso el modelo de Box-Jenkins que se va a calcular sólo tendrá como entrada la acción sobre las resistencias R1 y R2.

Nuevamente, para la obtención de este modelo, se recortan las señales y se eliminan medias y tendencias para tener las entradas y salidas en unidades incrementales, para luego poder calcular el modelo a partir de las señales procesadas. Así, las señales con las que se va a trabajar quedan de la siguiente forma:

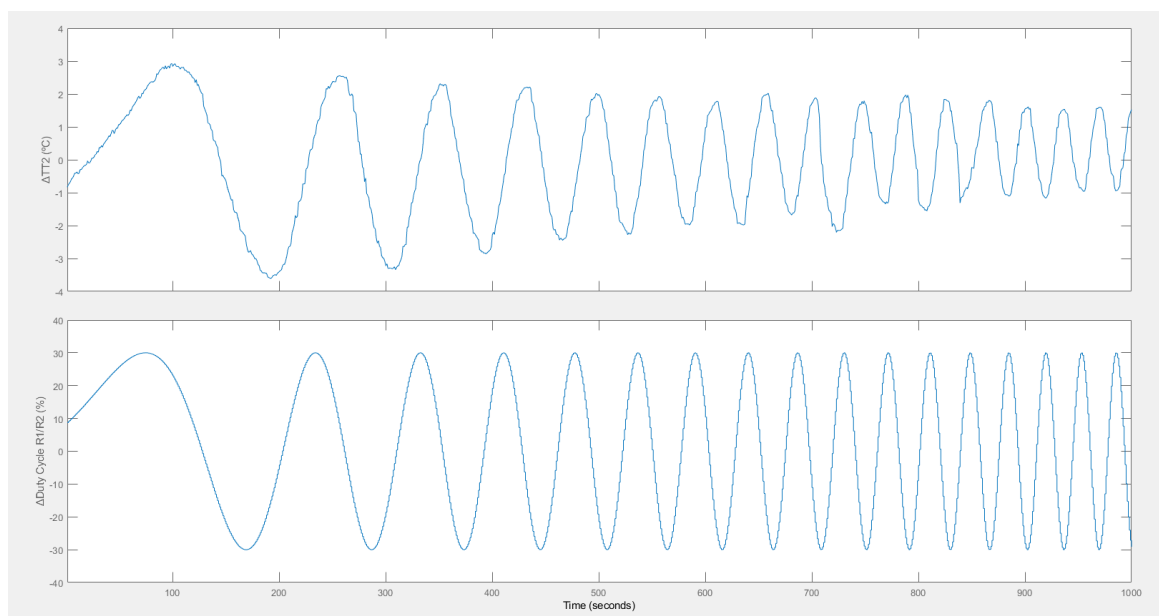


Figura 4.5 – Respuesta frecuencial procesada de TT2 ante ensayo chirp en R1/R2.

Una vez obtenidas las señales en valores incrementales, se procede al cálculo del modelo de Box-Jenkins de la misma forma que se ya hacía antes. Los parámetros que se han utilizado en este caso han sido:

$$nb = 3, \quad nc = 2, \quad nd = 3, \quad nf = 4, \quad nk = 15$$

De esta forma, el modelo de Box-Jenkins que se obtiene para el sistema R1/R2 – TT2 es el siguiente:

$$y(t) = \frac{0.0317 z^{-15} - 0.05973 z^{-16} + 0.02803 z^{-17}}{1 - 2.671 z^{-1} + 2.763 z^{-2} - 1.481 z^{-3} + 0.3884 z^{-4}} u(t) + \frac{1 - 0.6706 z^{-1} - 0.09697 z^{-2}}{1 - 1.301 z^{-1} - 0.1467 z^{-2} + 0.4613 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT2, $u(t)$ es la acción incremental de R1/R2 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Nuevamente, utilizando la función “compare” de Matlab para validar el modelo con los resultados obtenidos durante el anterior ensayo, los resultados son los siguientes:

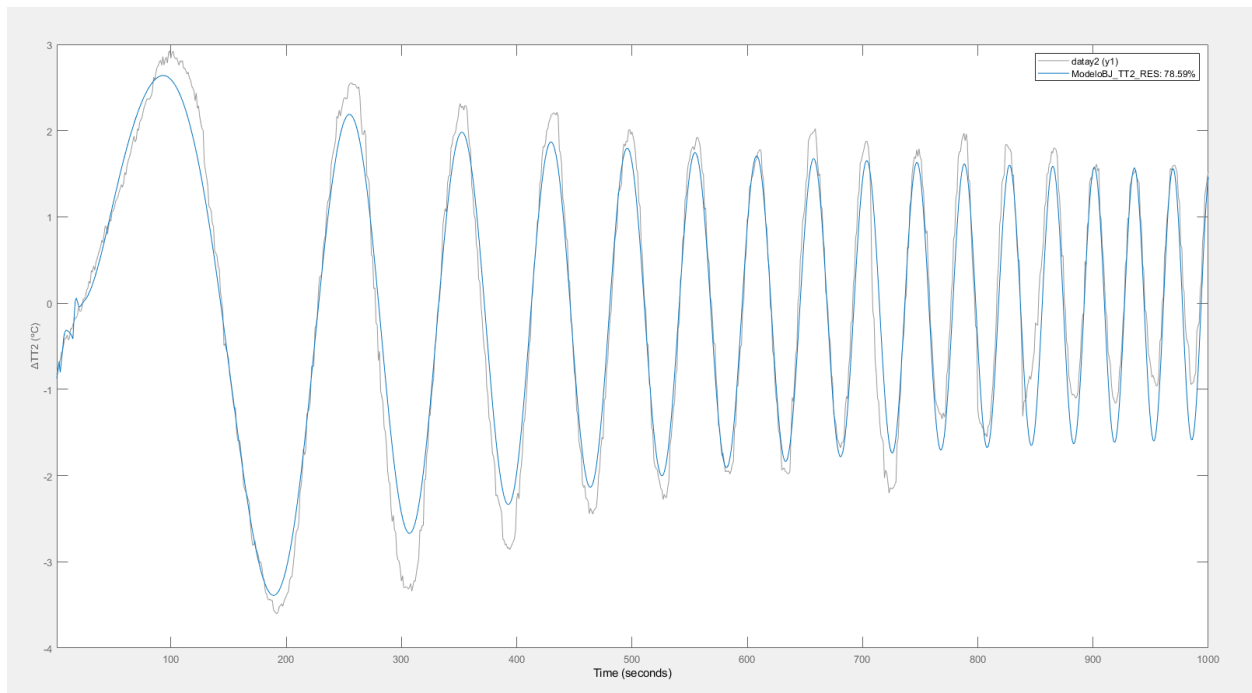


Figura 4.6 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT2 frente a R1/R2.

Como se puede apreciar, la respuesta del modelo es bastante próxima a la respuesta real, por lo que se podría dar por bueno el modelo obtenido.

A continuación, se pasa a estudiar la respuesta frecuencial de TT9 frente a las válvulas VR2 y VR3.

4.2. Respuesta frecuencial del sistema frente a las válvulas VR2 y VR3 de los intercambiadores de calor

Las condiciones en las que se ha realizado el ensayo para VR2 y VR3 han sido las mismas, salvo por el hecho de que, al realizar el ensayo para una de las válvulas, se mantiene la otra válvula a cero, y viceversa.

Para el ensayo mediante señal chirp de VR2 y VR3, el resto de variables de actuación se han fijado en los

siguientes valores:

$$R1 = R2 = 50\%, \quad VR1 = 30\%$$

Por otro lado, la señal chirp estará centrada en $VR2 = 50\%$ (y de igual manera para el ensayo en VR3), con una amplitud del 20%, de manera que la señal estaría contenida entre el 30% y el 70%.

Igual que ya se ha hecho antes para R1 y R2, la frecuencia mínima del ensayo se puede calcular a partir de la constante de tiempo de modelo de primer orden de VR2 o VR3 frente a TT9 (ya que la dependencia de TT2 con las válvulas de regulación de los intercambiadores de calor tiene una dinámica demasiado lenta como para que se considere objeto de estudio).

$$\omega_{min} = \frac{1}{10\tau} \approx \frac{1}{350} = 0.00286 \text{ rad/s}$$

Además, la constante de tiempo de VR2 y VR3 era aproximadamente igual, así que ha elegido esta frecuencia mínima para los dos ensayos.

Por su parte, una vez más, la frecuencia máxima será aquella que viene determinada por el tiempo de muestreo:

$$\omega_{m\acute{a}x} = 0.2 \text{ rad/s}$$

Así, los resultados que se han obtenido para el ensayo han sido los siguientes:

VR2 – TT9

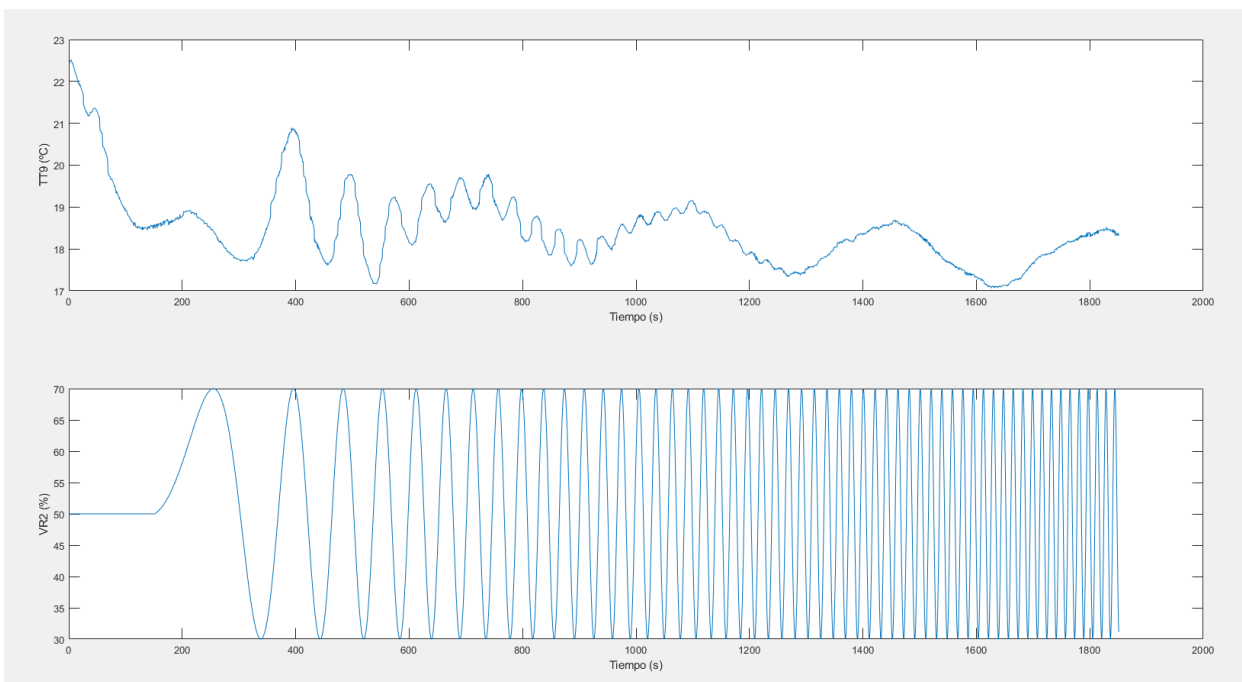


Figura 4.7 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR2.

En este caso, ya a simple vista se puede apreciar que TT5 también tiene un efecto en TT9, como viene siendo el caso. Además, para frecuencias altas, ni siquiera se registra que los cambios en VR2 produzcan un efecto en TT9, a lo que hay que añadirle que incluso la propia válvula VR2 real es incapaz de seguir la referencia que se le marca con la señal chirp. Por ello, se va a recortar el tramo del ensayo a partir de $t = 1200 \text{ s}$.

Así, recortando la señal y quitando medias y tendencias tanto a ésta como a VR2 y TT5, se tiene lo siguiente:

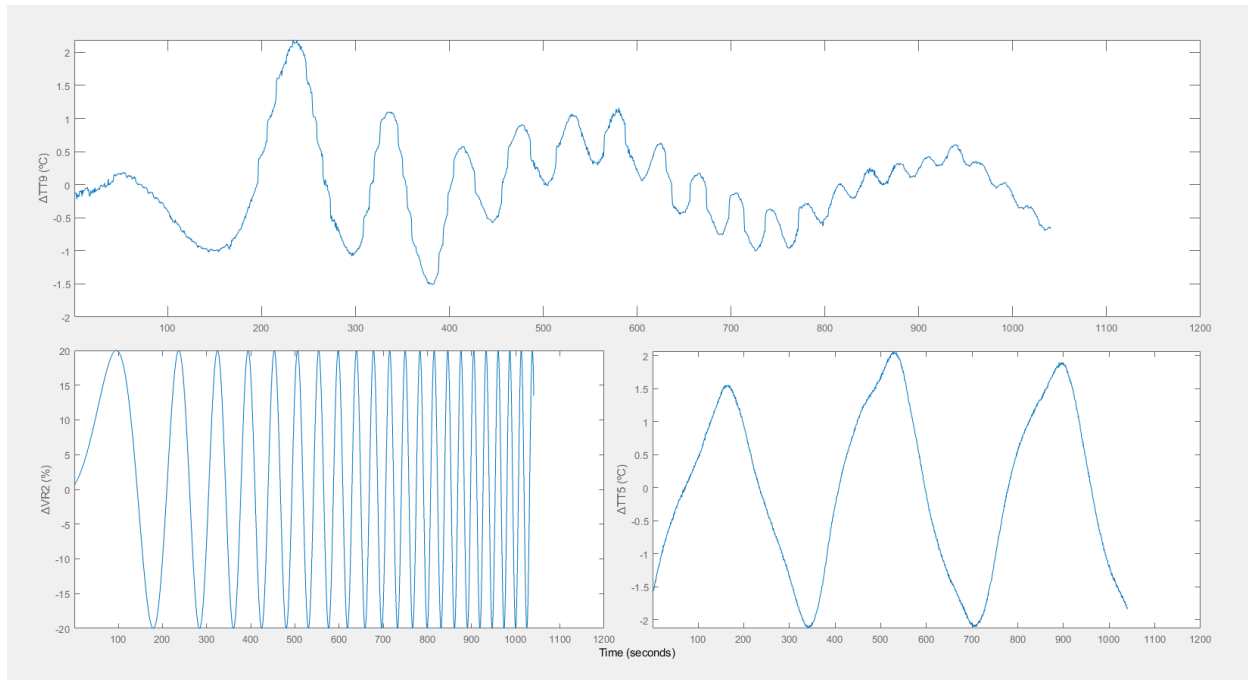


Figura 4.8 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR2.

Siguiendo el mismo procedimiento seguido hasta ahora, se procede ahora a calcular el modelo Box-Jenkins que se obtiene a partir de estos resultados. Para este modelo se han usado los siguientes parámetros:

$$nb = [2 \ 2], \quad nc = 3, \quad nd = 3, \quad nf = [3 \ 3], \quad nk = [50 \ 40]$$

Para lo cual se obtiene el siguiente modelo de Box-Jenkins:

$$y(t) = \frac{3.475 \cdot 10^{-5} z^{-50} - 4.143 \cdot 10^{-5} z^{-51}}{1 - 2.912 z^{-1} + 2.828 z^{-2} - 0.9164 z^{-3}} u_1(t) + \frac{0.02847 z^{-40} - 0.02074 z^{-41}}{1 - 1.106 z^{-1} + 0.389 z^{-2} - 0.2601 z^{-3}} u_2(t) + \frac{1 - 0.3665 z^{-1} - 0.457 z^{-2} + 0.08915 z^{-3}}{1 - 1.347 z^{-1} + 0.04555 z^{-2} + 0.3032 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT9, $u_1(t)$ es la acción incremental de VR2, $u_2(t)$ es el gradiente de temperatura de TT5 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Utilizando la función “compare” para la validación del modelo, se obtienen los siguientes resultados:

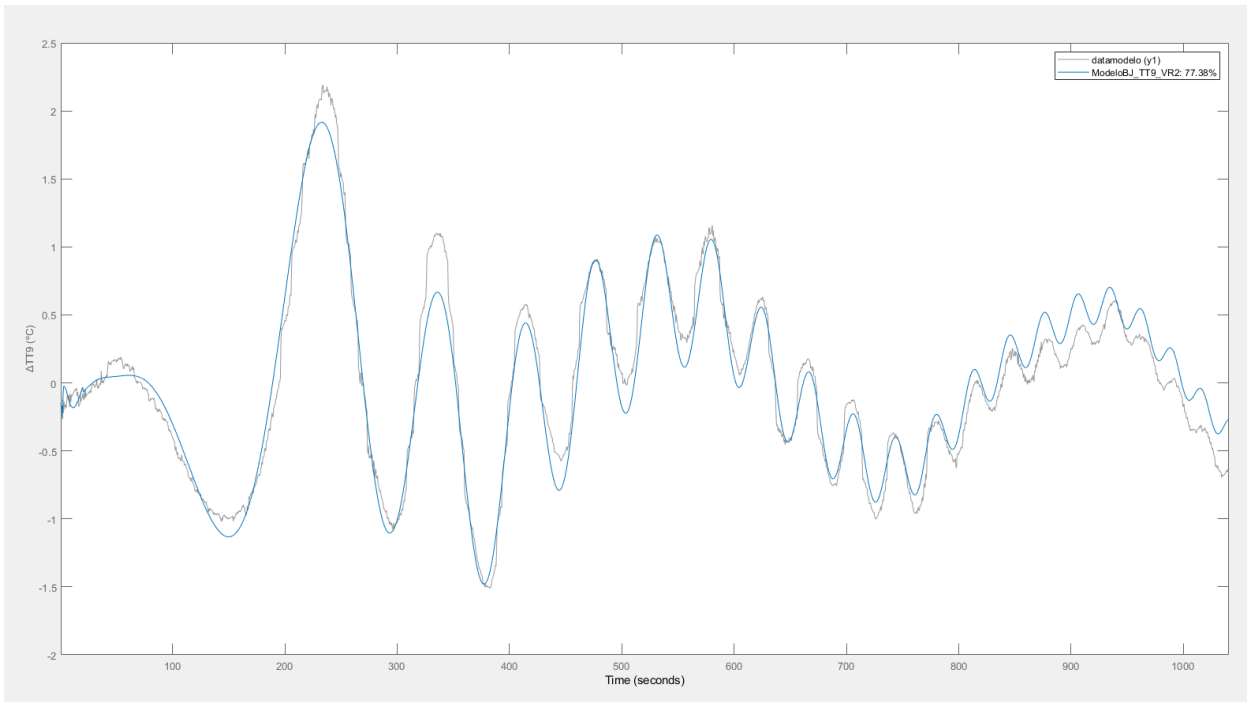


Figura 4.9 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR2.

Que son unos resultados bastante buenos y se puede observar que el modelo se ajusta a la respuesta real a lo largo del limitado rango de frecuencias con el que se puede trabajar con VR2.

A continuación, se pasa a realizar el mismo ensayo, pero ahora con VR3 en lugar de VR2.

VR3 – TT9

La respuesta de TT9 que se tiene ahora es la siguiente:

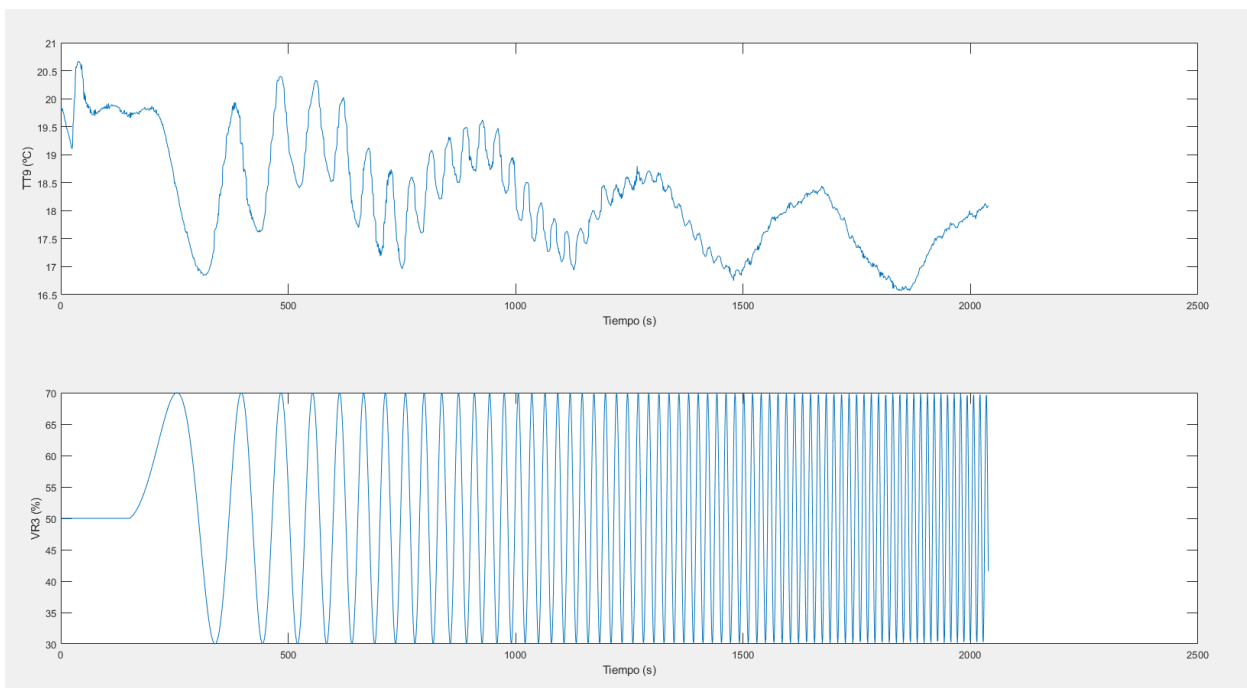


Figura 4.10 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR3.

En este caso, se puede observar cómo TT9 muestra respuesta ante la señal chirp introducida en VR3 hasta frecuencias algo mayores: donde antes se dejaba de observar el efecto de VR2 en TT9 a partir de, aproximadamente, $t = 1200$ s, ahora, con VR3, lo hace a partir de $t = 1500$ s, aunque las señales introducidas en ambas válvulas han sido exactamente las mismas.

Esto tiene sentido ya que, a frecuencias altas de la acción de la válvula, las variaciones en la temperatura del agua van a ser pequeñas, y al estar situada VR2 a una distancia mayor del punto donde se mide TT9 que VR3, las pérdidas en el transporte van a ser mayores y su efecto sobre TT9 acaba siendo menor.

En base a esto, el tramo del ensayo que se va a recortar ahora será a partir de $t = 1500$ s. Con ello y quitando medias y tendencias tanto a entradas como a salidas, se tiene lo siguiente:

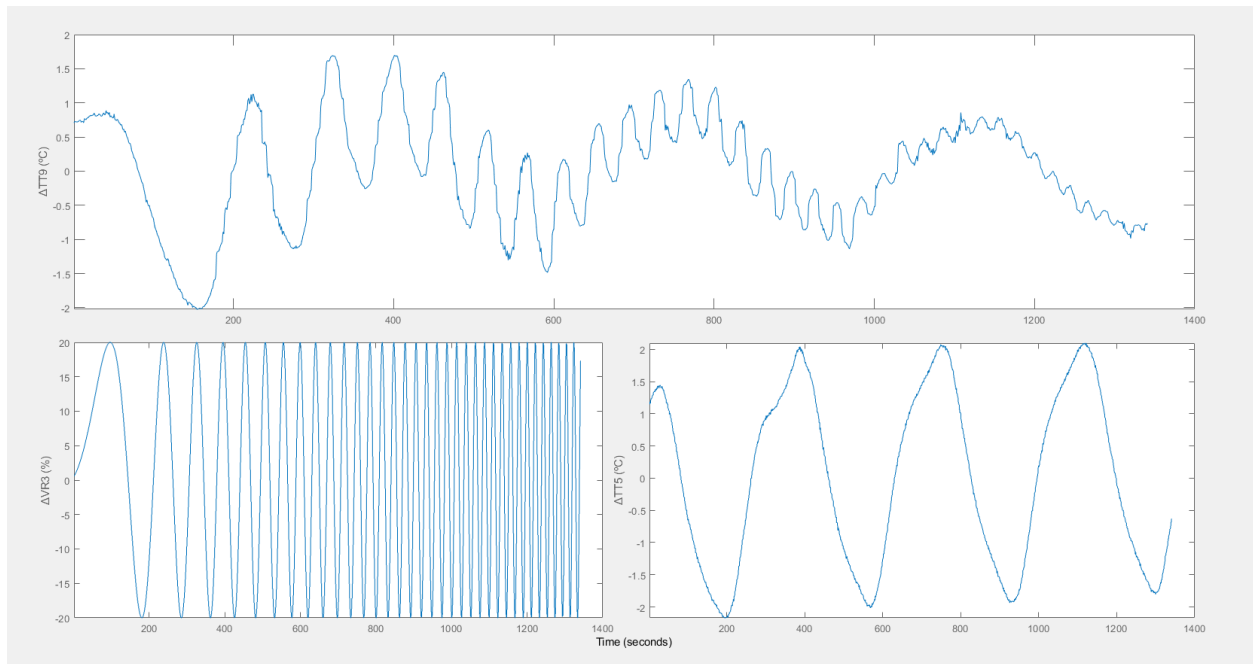


Figura 4.11 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR3.

En base a estos resultados, se diseña el modelo de Box-Jenkins con los siguientes parámetros:

$$nb = [3 \ 2], \quad nc = 3, \quad nd = 3, \quad nf = [3 \ 3], \quad nk = [20 \ 20]$$

Que generan el siguiente modelo:

$$y(t) = \frac{-0.001573 z^{-20} + 0.003109 z^{-21} - 0.00172 z^{-22}}{1 - 2.775 z^{-1} + 2.601 z^{-2} - 0.8239 z^{-3}} u_1(t) + \frac{0.01864 z^{-20} + 0.1146 z^{-21}}{1 + 0.4296 z^{-1} - 0.3529 z^{-2} - 0.7438 z^{-3}} u_2(t) + \frac{1 - 0.8292 z^{-1} - 0.3806 z^{-2} + 0.2288 z^{-3}}{1 - 1.558 z^{-1} + 0.2037 z^{-2} + 0.3541 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT9, $u_1(t)$ es la acción incremental de VR3, $u_2(t)$ es el gradiente de temperatura de TT5 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Así, utilizando la función “compare” para validar el modelo, se obtienen los siguientes resultados:

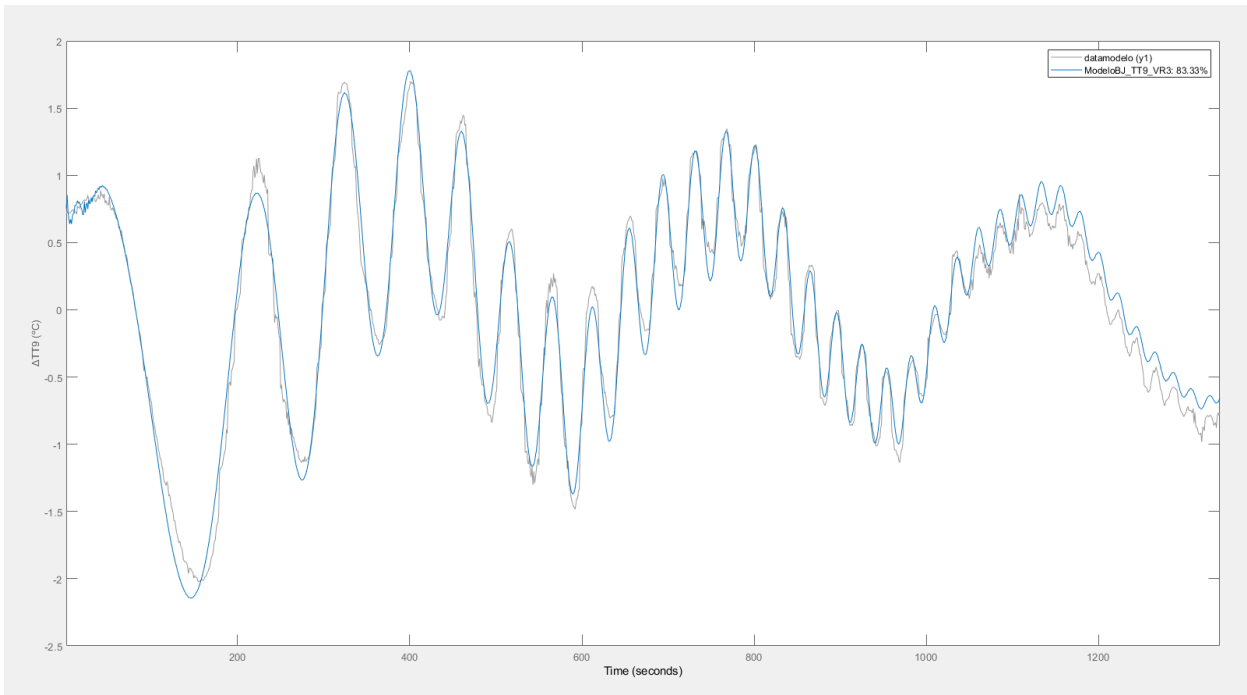


Figura 4.12 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR3.

Como se puede comprobar, los resultados en este caso también son bastante buenos, incluso para frecuencias altas, que no se incluyeron antes para VR2.

Se pasa ahora al estudio de la respuesta frecuencial de TT2 y TT9 frente a la válvula VR1.

4.3. Respuesta frecuencial de la planta frente a la válvula VR1

El último de los ensayos mediante señal chirp a realizar es el de la válvula VR1 que regula el caudal de agua impulsada a través de la planta.

Las condiciones en las que se ha realizado el ensayo han sido las siguientes:

$$VR2 = 30\%, \quad VR3 = 30\%, \quad R1 = R2 = 50\%$$

La señal chirp se ha centrado en $VR1 = 20\%$, con una amplitud del 15% del rango (de manera que VR1 oscila entre el 5% y el 35%).

Por otro lado, las constantes de tiempo de los VR1 frente a TT2 y TT9 son aproximadamente las mismas. Así, la frecuencia mínima de la señal chirp será:

$$\omega_{min} = \frac{1}{10\tau} \approx \frac{1}{200} = 0.005 \text{ rad/s}$$

Al igual que para los ensayos anteriores, la frecuencia máxima vendrá limitada por el tiempo de muestreo:

$$\omega_{m\acute{a}x} = 0.2 \text{ rad/s}$$

De esta manera, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

VR1 – TT9

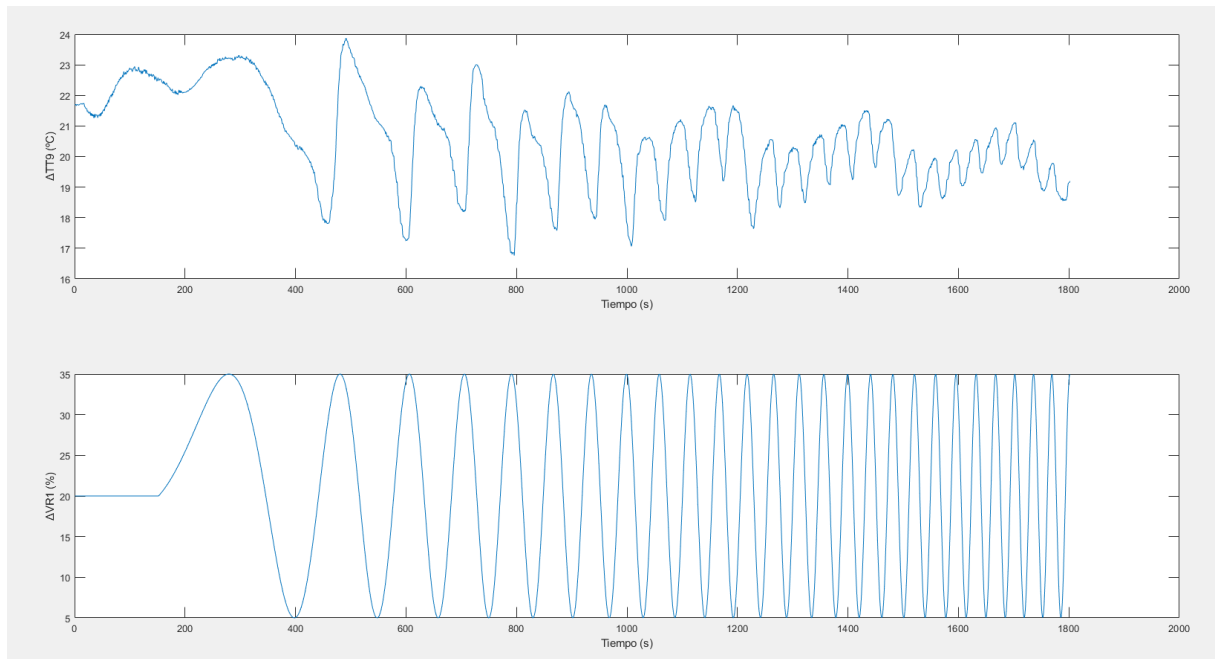


Figura 4.13 – Respuesta frecuencial de TT9 ante ensayo chirp en VR1.

Nuevamente, se puede apreciar el efecto que tiene la temperatura TT5 sobre TT9, por lo que se deberá tener en cuenta y se tomará como entrada del modelo de Box-Jenkins que se va a calcular.

Volviendo a recortar las señales de entrada y salida y eliminando medias y tendencias, las señales que quedan son las siguientes:

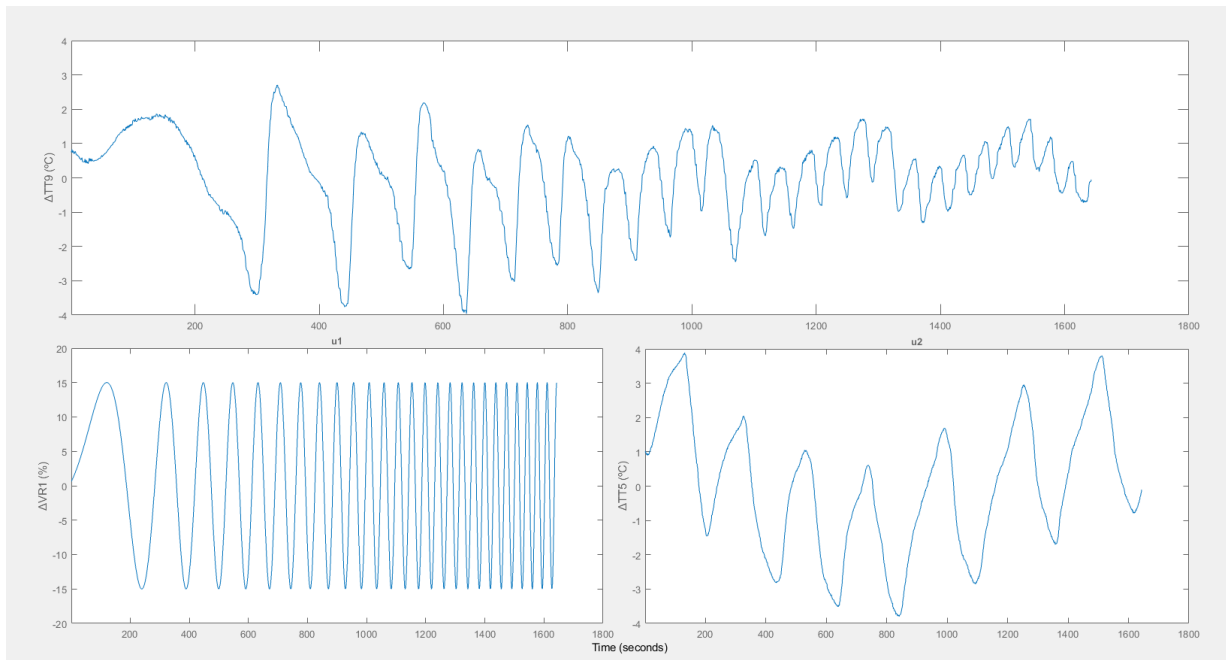


Figura 4.14 – Respuesta frecuencial procesada de TT9 ante ensayo chirp en VR1.

En el caso de VR1, la elección de los parámetros utilizados para el cálculo del modelo de Box-Jenkins es algo más complicada, principalmente debido al parámetro nk , que es el retraso (en número de períodos de muestreo)

que hay en la actuación. Debido a que los cambios en la temperatura TT9 que se dan por acción de VR1 se deben en realidad a los cambios que se producen en la acción de las resistencias y los intercambiadores de calor por el cambio en el caudal impulsado, el retraso del efecto de VR1 en TT9 es función del caudal (y, por tanto, de la propia VR1).

Esto se traduce en un cambio continuo en el retraso de la actuación a lo largo del ensayo, el cual depende del valor de VR1 en cada instante, y que también afectará al retraso del efecto que tiene TT5 en TT9. Por ello, para el cálculo del modelo de Box-Jenkins, se ha tomado un valor de nk el cual está basado en un valor intermedio de estos retrasos posibles.

De esta manera, los parámetros que se han elegido para el modelo de Box-Jenkins han sido los siguientes:

$$nb = [2 \ 2], \quad nc = 2, \quad nd = 3, \quad nf = [3 \ 3], \quad nk = [25 \ 45]$$

De lo cual se obtiene el siguiente modelo de Box-Jenkins:

$$y(t) = \frac{0.01292 z^{-25} - 0.01171 z^{-26}}{1 - 0.9699 z^{-1} - 0.867 z^{-2} + 0.8482 z^{-3}} u_1(t) + \frac{0.03524 z^{-45} + 0.03282 z^{-46}}{1 - 0.652 z^{-1} - 0.8434 z^{-2} + 0.8053 z^{-3}} u_2(t) + \frac{1 - 1.146 z^{-1} - 1 + 0.5103 z^{-2}}{1 - 2.101 z^{-1} + 1.349 z^{-2} - 0.2344 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT9, $u_1(t)$ es la acción incremental de VR1, $u_2(t)$ es el gradiente de temperatura de TT5 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Volviendo a utilizar la función “compare” de Matlab para validar el modelo se obtiene lo siguiente:

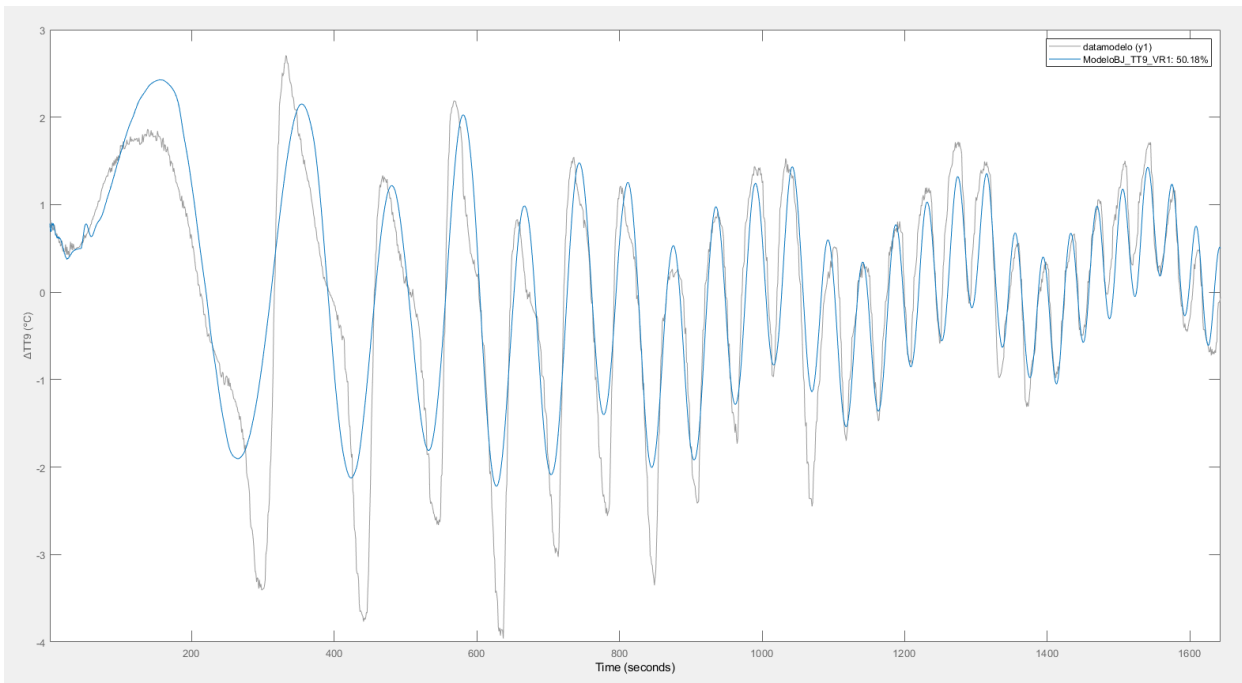


Figura 4.15 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT9 frente a VR1.

En este caso, el modelo no es tan bueno como ha sido en los casos anteriores. No obstante, teniendo en cuenta la complejidad que añade el hecho de que el retraso en la actuación vaya cambiando, y que aun así la respuesta es suficientemente buena para frecuencias bajas y bastante buena para frecuencias altas, se puede dar por bueno este modelo.

VR1 – TT2

Observando ahora la respuesta de TT2 a este mismo ensayo:

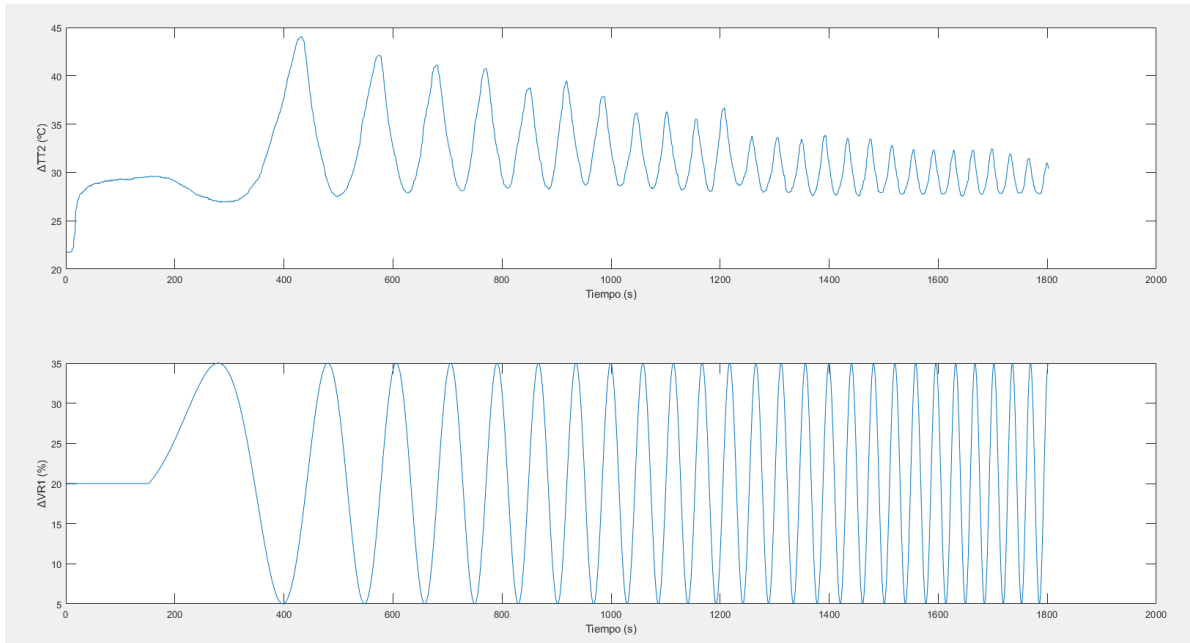


Figura 4.16 – Respuesta frecuencial de TT2 ante ensayo chirp en VR1.

Como ya ocurría antes, las oscilaciones de TT5 no tienen un efecto tan apreciable en TT2 como en TT9. En un principio se tomaron tanto VR1 como TT5 como entradas del sistema para el cálculo del modelo, y aunque se observaban algunas mejoras muy leves al validar el modelo, las diferencias con tomar sólo VR1 como entrada eran tan pequeñas que se ha decidido no incluir TT5 como entrada del sistema.

Volviendo a realizar el procesamiento de los datos para eliminar medias y tendencia y recortar sólo la parte del ensayo que es de interés, queda lo siguiente:

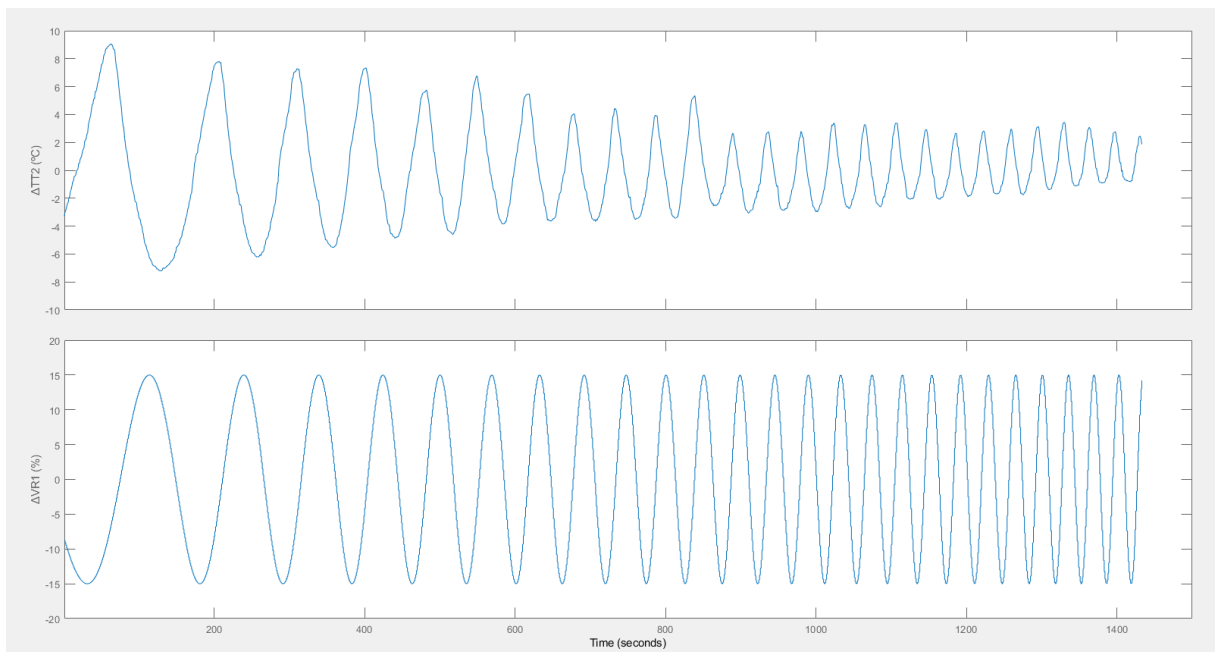


Figura 4.17 – Respuesta frecuencial procesada de TT2 ante ensayo chirp en VR1.

Es necesario mencionar que en este caso las señales se han recortado algo más, dejando fuera el tramo de $t=0$ a $t=370$ s, aproximadamente, ya que el primer tramo ascendente de VR1 no ha producido el efecto esperado en TT2 si se compara con el resto de oscilaciones de la señal chirp, y estos datos podrían resultar contraproducentes a la hora de obtener el modelo.

Al igual que ya ocurría para TT9, el retraso en la acción de VR1 sobre TT2 también va a cambiar a lo largo del ensayo dependiendo del valor de VR1 en cada instante. No obstante, debido a que la temperatura TT2 se mide justo después de pasar el agua por las resistencias, este retraso no se verá tan afectado como el que se da en el caso de TT9, que se mide mucho después.

Teniendo esto en mente, y en base al retraso medido en el ensayo, los parámetros del modelo de Box-Jenkins que se han elegido han sido los siguientes:

$$nb = 2, \quad nc = 3, \quad nd = 3, \quad nf = 3, \quad nk = 5$$

Estos parámetros proporcionan el siguiente modelo:

$$y(t) = \frac{-0.08637 z^{-5} - 0.01581 z^{-6}}{1 + 0.7762 z^{-1} - 0.9141 z^{-2} - 0.7064 z^{-3}} u(t) + \frac{1 - 1.566 z^{-1} + 0.894 z^{-2} - 0.1233 z^{-3}}{1 - 2.572 z^{-1} + 2.274 z^{-2} - 0.6932 z^{-3}} e(t)$$

Donde $y(t)$ es el gradiente de temperatura de TT2, $u(t)$ es la acción incremental de VR1 y $e(t)$ es el ruido del sistema.

Comparando su respuesta a la misma entrada que se ha utilizado para el ensayo con la respuesta real del sistema, se tiene lo siguiente:

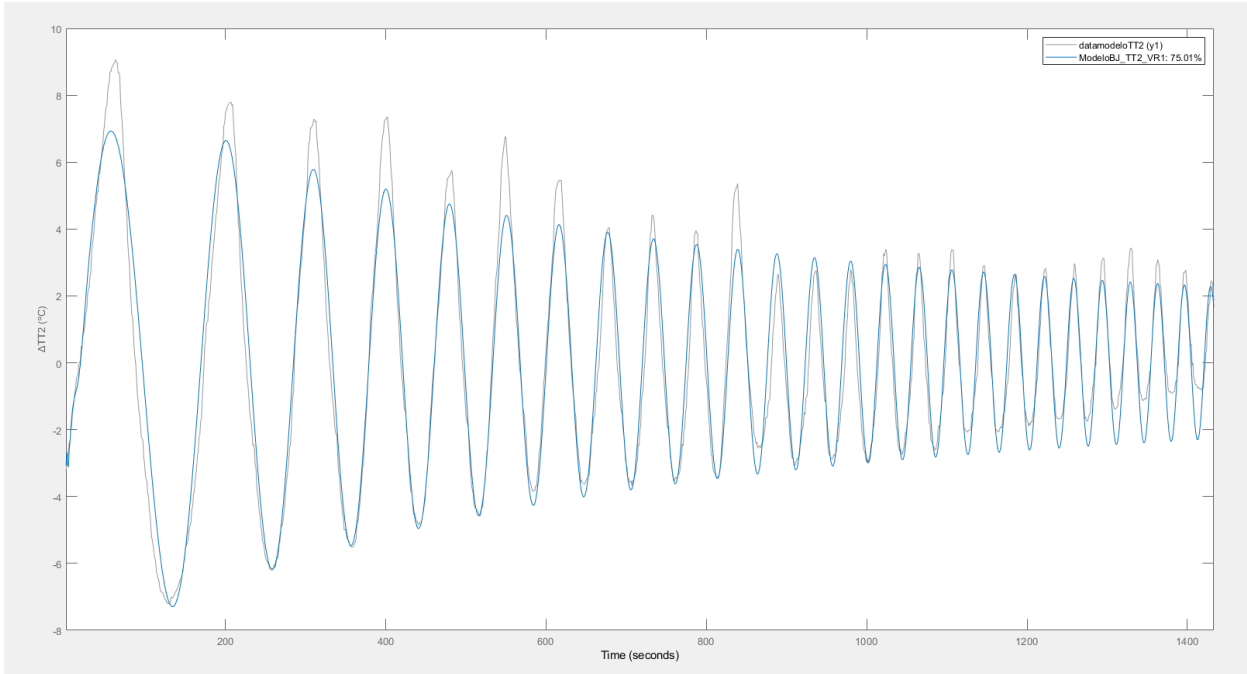


Figura 4.18 – Validación del modelo Box-Jenkins de TT2 frente a VR1.

Como puede observarse, la respuesta frecuencial de modelo de Box-Jenkins es bastante próxima a la real, salvo algunas variaciones de la temperatura media de TT2, especialmente apreciable en las frecuencias más altas del ensayo.

Con esto concluye la parte de identificación dinámica de los sistemas que componen la configuración 2 de la

planta multiprocesos. A continuación, se da paso a la tercera y última parte de este Trabajo de Fin de Grado, en la que se explicará el proceso de diseño, implementación y prueba de las distintas estrategias de control que se han propuesto para las dos configuraciones de la planta.

5 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PARA LA CONFIGURACIÓN 1 DE LA PLANTA

Como ya se hizo referencia en el apartado 2 de este trabajo, donde se explicaba el funcionamiento de las dos posibles configuraciones de la planta, se ha implementado una única estrategia de control para la configuración 1 de la planta, que consistirá en un control en cascada del nivel LT del tanque contenedor de agua mediante la válvula VR1, con el caudal FT, que es medible, como variable intermedia.

Recordando la descripción realizada de la configuración 1 de la planta en el apartado 2 del trabajo, el esquema de la planta en dicha configuración era el siguiente:

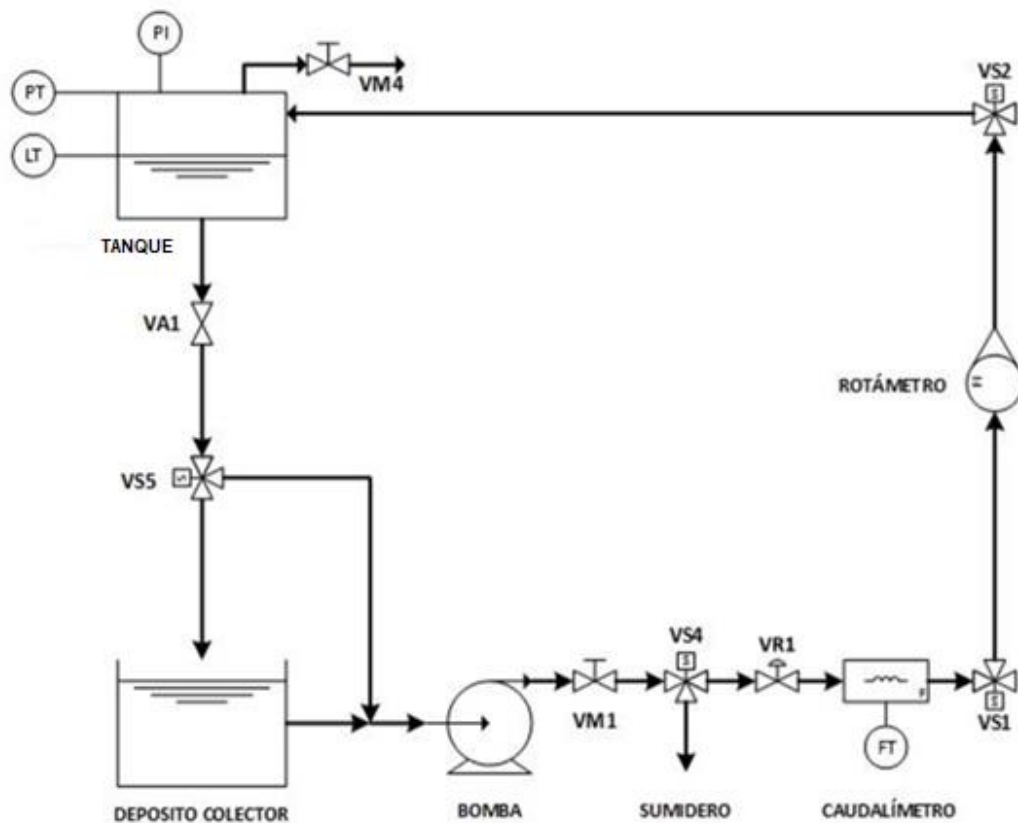


Figura 1.1 – Esquema de funcionamiento de la planta en la configuración 1.

A la hora de controlar el nivel del contenedor de agua de la planta multiprocesos, se dispone de una única variable de actuación: la válvula VR1 que regula el caudal de agua impulsado, FT. Por tanto, para el control del nivel, bastaría con un controlador simple que regule VR1 en función de la referencia de nivel LT que se haya configurado.

No obstante, dicho controlador simple estaría basado en el hecho de que para un valor de VR1, siempre se tiene, aproximadamente, un mismo valor de caudal, o lo que es lo mismo, el caudal FT se mantiene constante si VR1 también es constante. De esta manera, si el caudal cambiase por causas ajenas a VR1, la eficacia del controlador se vería afectada: las referencias tardarían más en alcanzarse y sería más difícil mantener el nivel fijo en la referencia si hay cambios continuos en el valor del caudal.

El control en cascada se propone para solventar precisamente este problema: al tener siempre una medida de FT, se podrá responder a cambios en dicho caudal de manera más rápida a lo que se haría si se trabajase sin dicha medida, de manera que el rechazo a perturbaciones que afecten directamente al caudal impulsado será mucho mayor.

El principio de funcionamiento del control en cascada se basa [6] en la utilización de una variable intermedia, además de la variable de actuación principal, para el control de la variable final. En este caso, la variable de actuación principal es la válvula VR1, mientras que la variable intermedia es el caudal FT y la variable a controlar es el nivel LT del contenedor de agua. El esquema de un controlador en cascada es el siguiente:

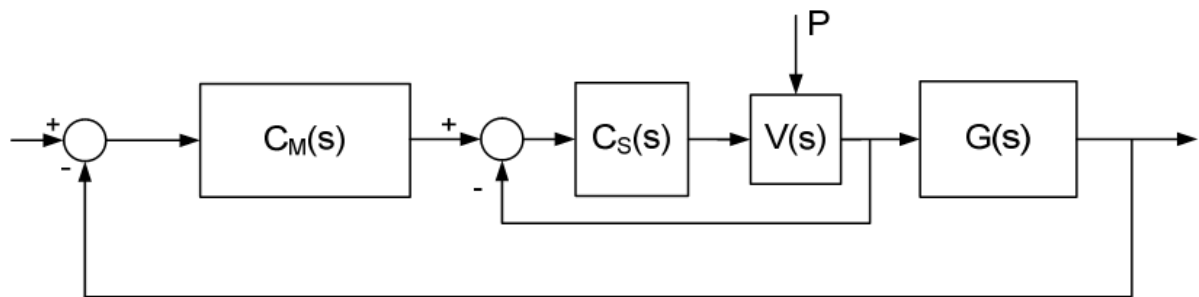


Figura 5.1 – Esquema de la estructura de un controlador en cascada.

Donde $C_M(s)$ es el controlador que fija la referencia de caudal en función del nivel, $C_S(s)$ es el controlador que fija el valor de VR1 en función del caudal, $V(s)$ es el sistema real que relaciona la apertura de la válvula con el caudal impulsado, y $G(s)$ es el sistema real que relaciona el caudal impulsado con el nivel de agua del contenedor.

Siguiendo este esquema, mediante una referencia de nivel y el nivel actual medido, que es realimentado, se fija un valor del caudal necesario para alcanzar dicha referencia mediante el controlador C_M . Por otro lado, una vez fijada la referencia de caudal, y mediante el valor real de caudal medido en cada momento, que también es realimentado, se obtiene, a partir del controlador C_S , un valor de la apertura de la válvula VR1 que proporcionará dicho caudal (siempre que sea posible en las condiciones de funcionamiento).

Para el diseño del controlador en cascada se va a seguir el siguiente procedimiento:

- 1) En primer lugar, se diseñará un controlador simple para control del nivel LT mediante VR1, que será utilizado como base del controlador primario del control en cascada (con algunas modificaciones) y para comparar su funcionamiento con el del controlador en cascada, con el fin de poder observar las mejoras en el control.
- 2) A continuación, se ajustará dicho controlador simple para que pueda actuar como controlador primario del control en cascada y se diseñará el controlador secundario, de manera que ya se pueda implementar el control en cascada.
- 3) Se realizará un ensayo sobre ambas estrategias de control y se compararán los resultados para poder observar las mejoras que proporciona el control en cascada frente al control simple.

5.1. Diseño del controlador PID simple del nivel LT mediante VR1

El funcionamiento que se busca en el controlador del nivel del contenedor de agua es simple: se busca que la referencia se alcance lo más rápido posible y que, una vez alcanzada, el nivel se mantenga en dicha referencia hasta que haya un cambio en ésta. Para que esto ocurra, el valor del caudal deberá ser lo mayor posible si la referencia está por encima del nivel actual, lo menor posible si la referencia está por debajo del nivel actual, e igual al caudal de descarga del contenedor cuando se encuentre sobre el nivel de referencia.

Para que esto sea así, idealmente, la señal VR1 estará saturada al 100% cuando el nivel de referencia sea mayor y al 0% cuando sea menor, mientras que se mantendrá al valor correspondiente que proporcione el valor del caudal que sea igual al coeficiente de descarga para cuando el nivel se encuentre en la referencia.

Con esto en mente, se han elegido unos parámetros del controlador PID que garanticen que $VR1 = 100\%$ si la referencia está a más de aproximadamente 3 cm por encima, y que $VR1 = 0\%$ si está a más de 3 cm por debajo. El nivel de agua del contenedor es una variable muy fácil de controlar, y no es necesario que el ajuste de los parámetros del controlador PID sea muy preciso para obtener resultados muy buenos. Por ello, en un principio

se eligen arbitrariamente los siguientes parámetros iniciales para el controlador PID, que serían ajustados posteriormente:

$$K_p = 40$$

$$T_i = 10$$

$$T_d = 0.5$$

Además, el controlador PID dispone de anti wind-up mediante el método de clamping, que impide que el valor del término integral siga aumentando (o disminuyendo, según corresponda) cuando se alcanza el valor de saturación fijado para la entrada (en este caso, $VR1_{min} = 1\%$ y $VR1_{max} = 100\%$). Con esto se consigue que el valor del término integral no se dispare si se tarda mucho en alcanzar la referencia si la entrada está realmente saturada.

Realizando un simple ensayo de seguimiento de referencias, con el objetivo de comprobar el funcionamiento del controlador, se obtienen los siguientes resultados:

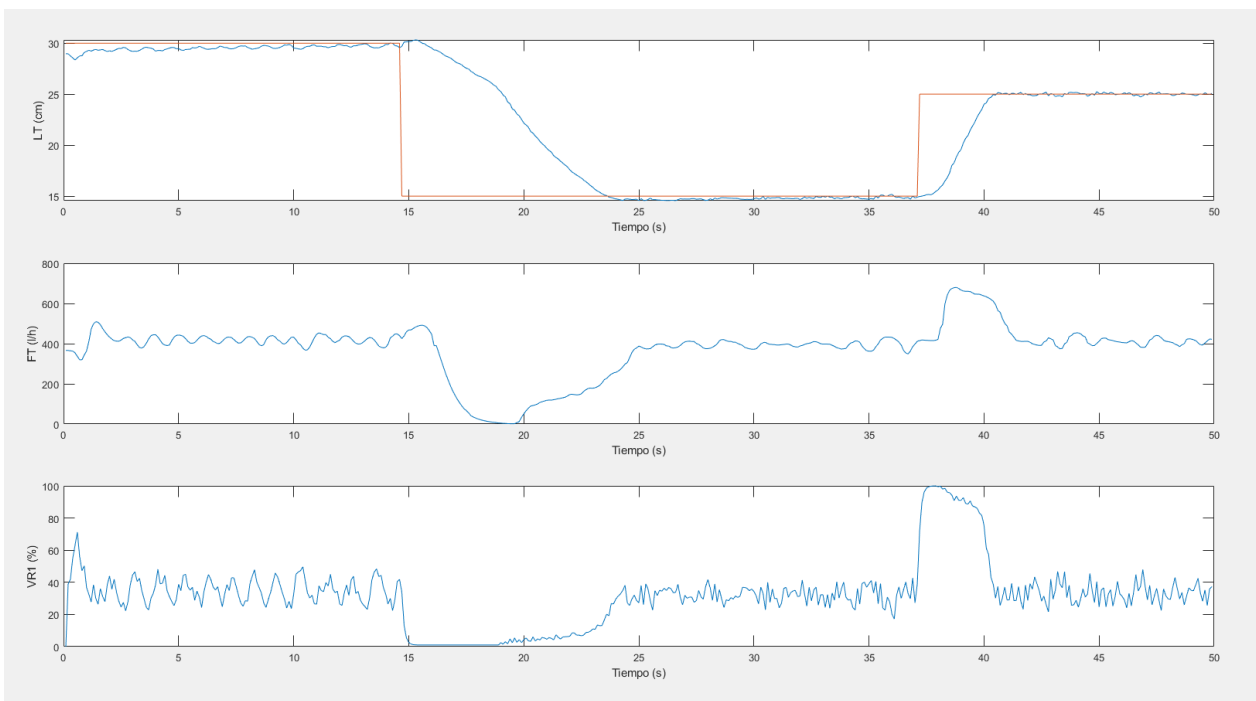


Figura 5.2 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de nivel PID simple con parámetros iniciales.

Como se puede observar, el control con estos parámetros es algo agresivo. Si bien se alcanzan sin problema las referencias de nivel, ante escalones muy grandes en la referencia, la variable VR1 y, por tanto, el caudal, oscilan constantemente en torno a los puntos de equilibrio. Por ello, los parámetros se han modificado ligeramente para conseguir una respuesta más suave del sistema. Los parámetros finales del controlador son los siguientes:

$$K_p = 30$$

$$T_i = 12$$

$$T_d = 0.133$$

Volviendo a realizar ahora el mismo ensayo que antes, se obtienen los siguientes resultados:

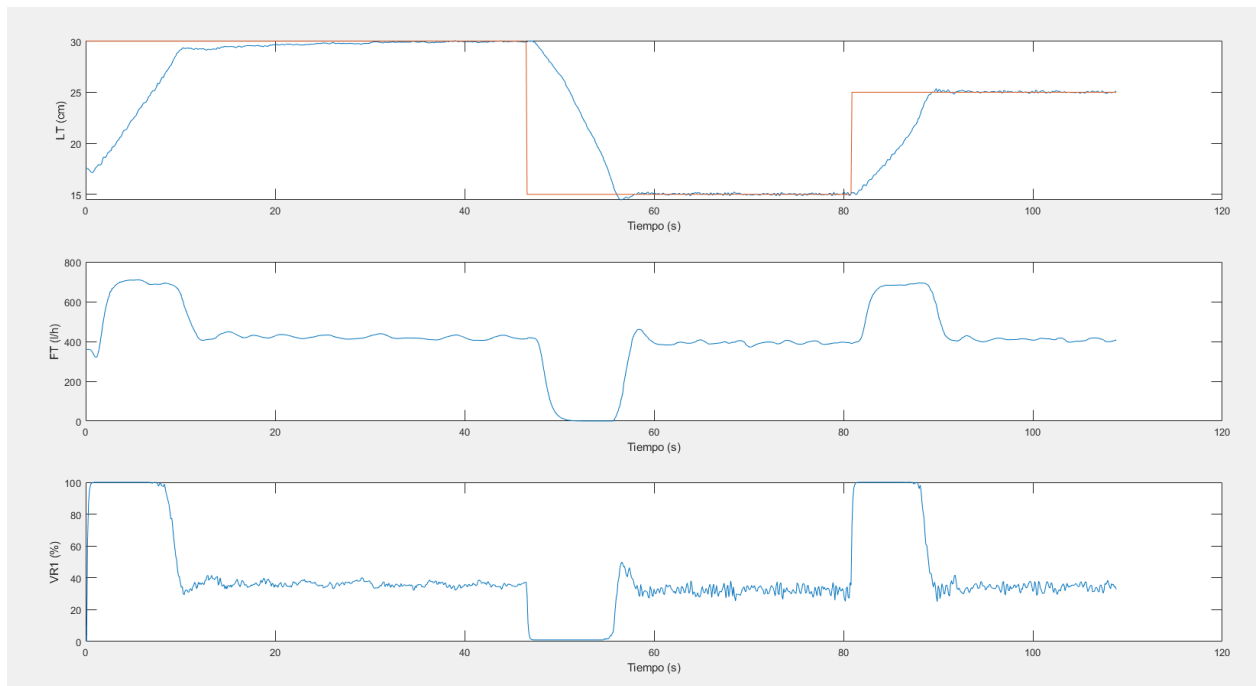


Figura 5.3 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de nivel PID simple con parámetros ajustados.

Como se puede observar, los resultados siguen siendo bastante buenos en cuanto a seguimiento de referencias, y la variable de control se mantiene mucho más estable en los puntos de equilibrio.

A continuación, se da paso al diseño del controlador en cascada.

5.2. Diseño del controlador en cascada del nivel LT

Para el control en cascada del nivel del tanque se han utilizado dos controladores PID: un controlador primario que, a través de la referencia de nivel que se le proporcione al sistema, fija la consigna de caudal en cada momento para alcanzar dicha referencia, y un controlador secundario que, a partir de dicha consigna de caudal, fija el valor de VR1 que proporcionará dicho caudal.

Para el diseño del controlador primario se puede aprovechar el propio controlador simple que ya se diseñó en el apartado anterior. Este controlador simple se diseñó para controlar el nivel mediante VR1, mientras que el controlador primario del control en cascada realizará el control mediante el caudal FT. No obstante, debido a que, al realizar un cambio en VR1, esto se traduce como un cambio prácticamente inmediato también en el caudal FT, sólo será necesario ajustar las ganancias del controlador para que este pueda ser utilizado como controlador principal del control en cascada.

Este ajuste de ganancias se realizará a partir del modelo de primer orden obtenido que relaciona FT con VR1. El modelo de primer orden que se obtuvo fue el siguiente:

$$G(s) = \frac{7.58}{2s + 1} e^{-2s}$$

Es decir, por cada 1% que aumenta VR1, el caudal aumenta en 7.58 l/h, aproximadamente. Por otro lado, es conveniente recordar que en la característica estática de FT frente a VR1 se comprobaba que esta dependencia no es lineal, sino que varía, haciendo cada vez más pequeña conforme aumenta el valor de VR1. Sin embargo, a efectos del ajuste de los parámetros del controlador, esta aproximación es suficientemente buena.

Teniendo esto en mente, para adaptar el controlador simple que se tenía antes al control en cascada y poder utilizarlo como controlador principal, simplemente se tienen que multiplicar las ganancias del PID por la ganancia de este modelo, $K_v = 7.58$:

$$K_{p1} = 227.4 \approx 230$$

$$K_{i1} = \frac{K_p}{T_i} = 18.95 \approx 19$$

$$K_{d1} = K_p * T_d = 30.24 \approx 30$$

Que serán los parámetros iniciales del controlador principal del control en cascada, a falta de que se realicen los ajustes necesarios cuando se compruebe de manera experimental su funcionamiento.

Por otro lado, se necesita también diseñar el controlador secundario del control en cascada, que fije el valor de VR1 en función de la referencia de caudal que proporciona el controlador primario. En este caso, se ha diseñado simplemente un controlador PI, ya que no se ha considerado necesario disponer de término derivativo para este controlador también.

Para el diseño del controlador secundario, se aprovecha también el modelo obtenido que relaciona VR1 con el caudal FT, utilizando las constantes de dicho modelo para obtener los parámetros del controlador PID a partir del método AMIGO.

El método de ajuste empírico de PID AMIGO (Approximate M-constrained integral gain Optimisation), desarrollado por Karl Johan Åström y Tore Häggglun [7], permite obtener una primera aproximación de los parámetros ideales de un controlador PID bastante buena. Para la obtención de dichos parámetros, el método se basa en la aplicación de una serie de ecuaciones que relacionan la ganancia K , la constante de tiempo τ y el retraso L de un sistema, con los parámetros K_p , T_i y T_d del controlador PID que se pretende diseñar. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right)$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8\tau}{L + 0.1\tau} L$$

$$T_d = \frac{0.5L\tau}{0.3L + \tau}$$

En este caso, sólo son de interés los valores de K_p y de T_i , que aplicando las ecuaciones al modelo de primer orden que se tiene, son:

$$K_{p2} \approx 0.0857$$

$$T_{i2} \approx 2.18$$

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} \approx 0.0393$$

Igual que ya ocurría para el controlador PID simple del apartado anterior, tanto el controlador primario como el secundario disponen también de anti wind-up mediante el método de clamping. En este caso, los valores de VR1 estarán comprendidos también entre el 1% y el 100%, mientras que los valores de FT estarán comprendidos entre 5 l/h y 700 l/h, que son, aproximadamente, los valores del caudal impulsado para dichos límites de VR1.

Realizando algunas pruebas de seguimiento de referencias, se ha comprobado que, al igual que ya ocurría con el controlador simple, los parámetros del controlador primario hacen que sea demasiado agresivo, por lo que se han ajustado de la siguiente manera:

$$K_{p1} = 120$$

$$K_{i1} = 17.5$$

$$K_{d1} = 15$$

Por otro lado, al controlador secundario le ocurría lo contrario: tardaba demasiado en alcanzar las referencias de caudal que fijaba el controlador primario. Por ello, se han cambiado sus parámetros a los siguientes:

$$K_{p2} = 0.1$$

$$K_{i2} = 0.1$$

Estos nuevos parámetros conseguirán un mucho mejor seguimiento de referencias, sin que haya cambios bruscos continuamente en el valor de VR1 para conseguirlo.

Ahora que ya se tienen tanto el controlador simple PID como el controlador en cascada definitivos, se puede pasar a un ensayo más exhaustivo de ambos para comparar cómo su funcionamiento.

5.3. Ensayo y comparación de resultados del controlador PID simple y el controlador en cascada

El ensayo que se ha propuesto realizar para comprobar el funcionamiento de ambas estrategias de control ha consistido en una serie de escalones en la referencia de nivel y cambios en distintas variables que afectan al sistema y que se han considerado como perturbaciones.

Las tres variables modificables que se han considerado como perturbaciones han sido la apertura de la válvula VA1 de descarga del tanque, la toma de presión del tanque, que actuará principalmente en contra de la descarga del tanque, impidiendo que el nivel baje a partir de un punto determinado cuando la toma esté cerrada, y por último la válvula VM3, que regula el caudal de agua que se deja pasar a través del rotámetro y que se podrá utilizar como una variable que afecte directamente al caudal impulsado hasta el contenedor de agua.

Con esto en mente, se ha diseñado el siguiente ensayo para comprobar el comportamiento del sistema con cada estrategia de control a medida que se realizan cambios en la referencia de nivel del tanque y se modifican los valores de estas perturbaciones:

- En un principio, se fija la referencia de nivel a **$LT = 30 \text{ cm}$** , y la válvula **VA1 a la posición 2.3**.
- A continuación, se realiza un escalón a **$LT = 15 \text{ cm}$** , y posteriormente otro escalón a **$LT = 35 \text{ cm}$** .
- Cuando el nivel se encuentre estable en **$LT = 35 \text{ cm}$** , se cambia lleva la válvula **VA1 hasta la posición 2.7**.
- Después de esto, se vuelve a cambiar la referencia a **$LT = 15 \text{ cm}$** y una vez alcanzada, se vuelve a cambiar **VA1 a la posición 1.9**.
- Nuevamente, se cambia la referencia de nivel a **$LT = 30 \text{ cm}$** , y se devuelve la válvula **VA1 a la posición inicial, 2.3**.
- A continuación, se vuelve a cambiar la referencia de nivel a **$LT = 15 \text{ cm}$** , y mientras que el nivel está bajando para alcanzar dicha referencia, se cierra la toma de presión del tanque. Una vez que se observe que el nivel se mantiene constante (aunque no va llegar a la referencia), se vuelve a abrir la toma de presión.
- Por último, una vez se alcance la referencia, se vuelve a cambiar ésta a **$LT = 30 \text{ cm}$** , cerrándose la toma de presión mientras que se intenta alcanzar la referencia para comprobar si esto tiene un efecto también en el tramo ascendente. Una vez alcanzada, se abre la toma de presión de nuevo y termina la primera parte del ensayo.

A continuación de esta primera parte, se realiza otro ensayo en el que se compara la respuesta a cambios en VM3 de ambas estrategias de control. Aquí es donde se podrá observar la principal ventaja del control en cascada frente al control simple, que es el rechazo a la perturbación que afecta directamente al caudal impulsado.

Para ello, el ensayo ha consistido en simplemente cerrar parcialmente la válvula VM3, y posteriormente volver a abrirla. Debido a que esta válvula es de acción manual y que, al contrario que la válvula VA1, no dispone de un indicador de la posición que tiene, no es posible saber con certeza cuál es la posición exacta que ha tenido la válvula durante el ensayo.

No obstante, el cambio que se ha realizado en la válvula ha sido el mismo para los ensayos en los dos

controladores, y además se ha comprobado previamente que no afecta en gran medida al funcionamiento del sistema: esto es, la acción en la válvula VM3 modifica el valor del caudal, pero no de tal manera que sea imposible mantener el tanque en la referencia marcada, para lo cual no tendría sentido el ensayo.

Los resultados que se han obtenido para estos ensayos han sido, por tanto, los siguientes:

Controlador PID simple

Ensayo 1

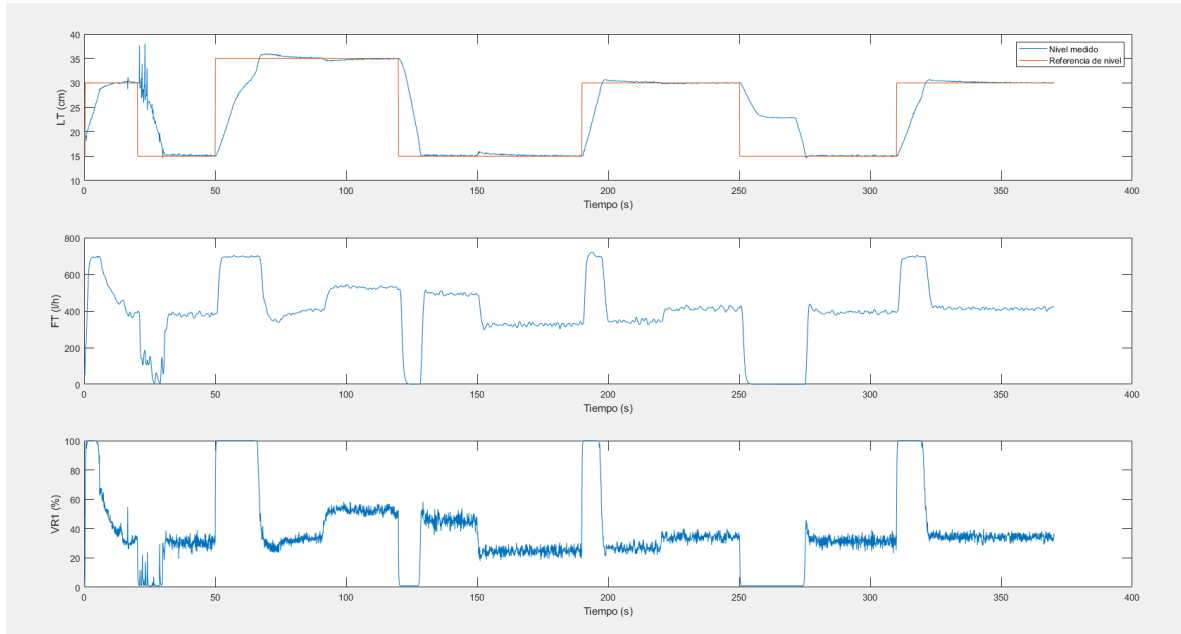


Figura 5.4 – Ensayo 1 del controlador de nivel PID simple.

Se pueden apreciar algunos errores de ruido del sensor de nivel al principio de este ensayo, pero sólo durante varios segundos, de manera que no ha tenido ningún efecto negativo en el control del nivel.

Ensayo 2

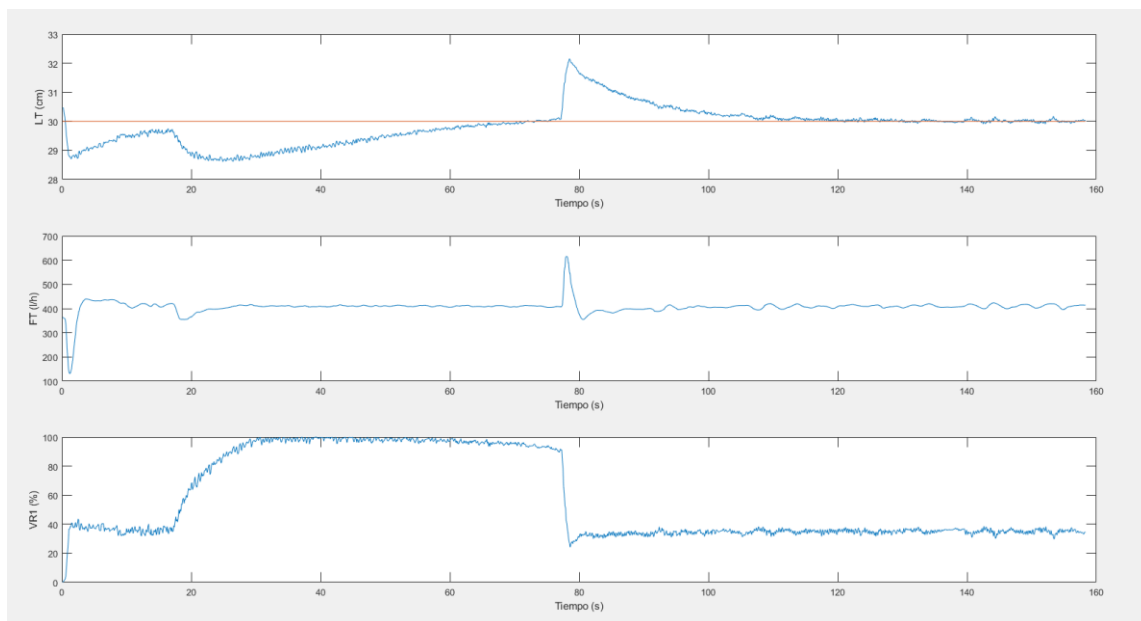


Figura 5.5 – Ensayo 2 del controlador de nivel PID simple.

Como se puede observar, el controlador simple hace un trabajo bastante bueno en cuanto al seguimiento de referencias y también al responder a las perturbaciones VA1 y de la toma de presión. No obstante, la respuesta frente a la perturbación en VM3 podría mejorar: si bien se mantiene el nivel relativamente próximo a la referencia, el controlador tarda un tiempo en llevar el nivel de nuevo a la referencia exacta.

Control en cascada

Ensayo 1

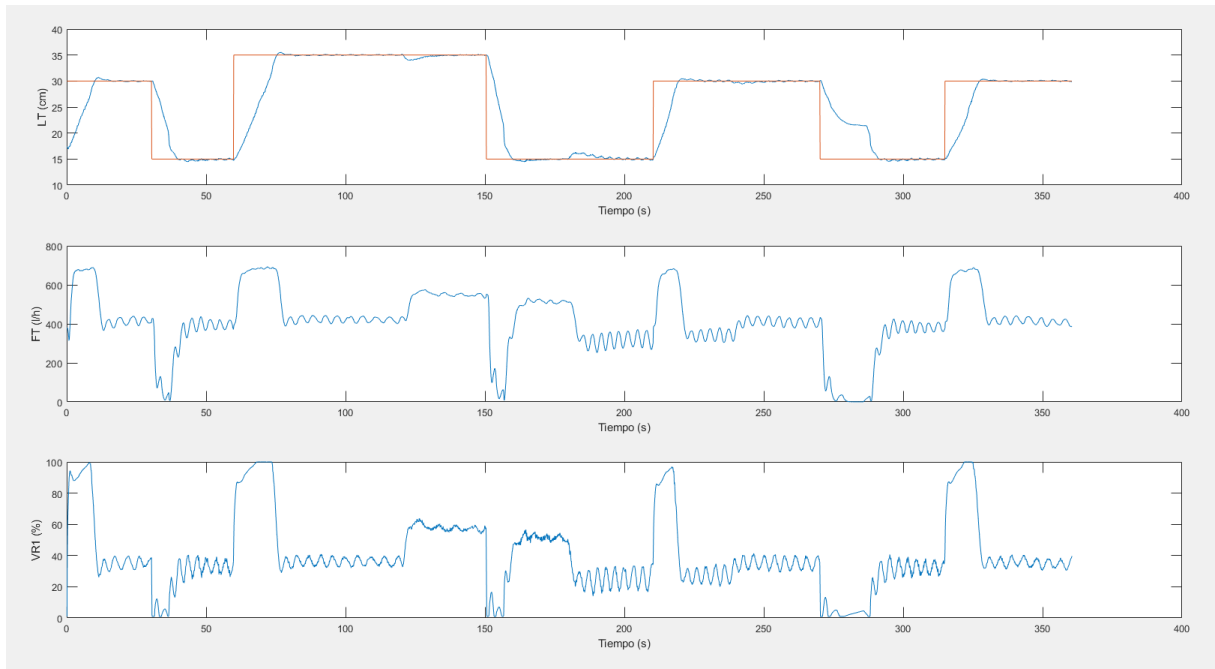


Figura 5.5 – Ensayo 1 del control en cascada de nivel del tanque.

Ensayo 2

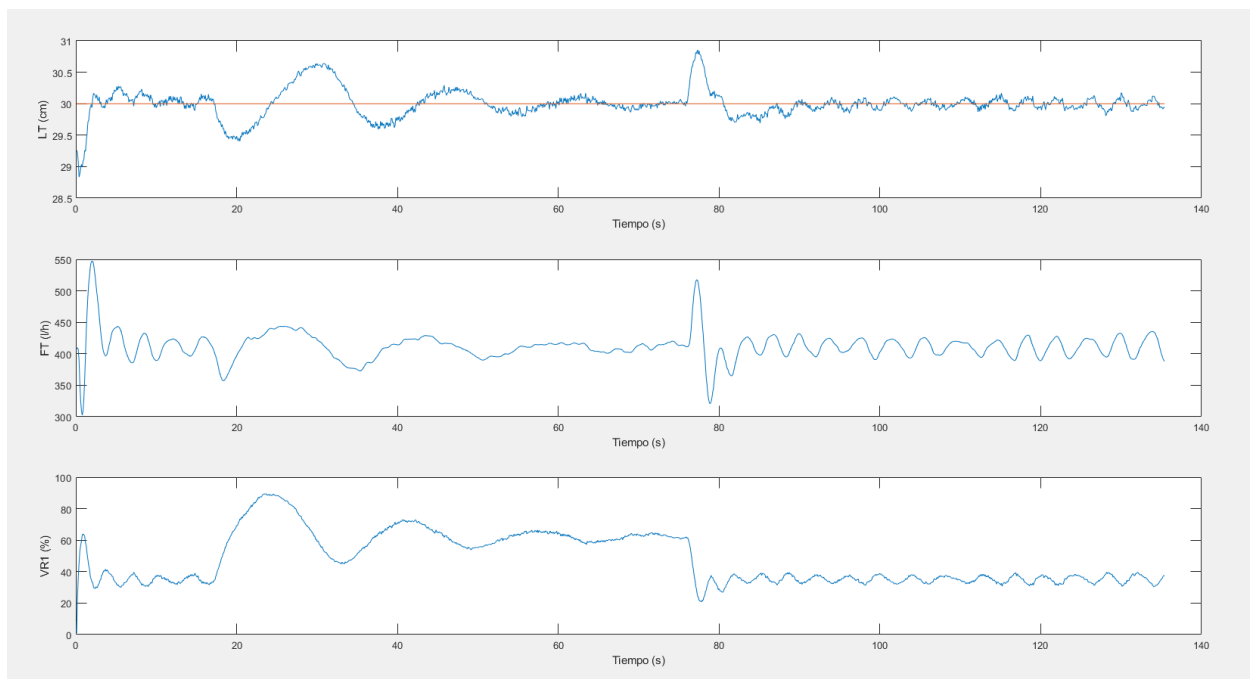


Figura 5.6 – Ensayo 2 del control en cascada de nivel del tanque.

En lo que se refiere al seguimiento de referencias y rechazo a las perturbaciones VA1 y de la toma de presión, el control en cascada se comporta de manera muy similar al control simple, aunque la variable de control, VR1, oscila más en torno a los distintos puntos de equilibrio. Esto podría mejorarse ajustando los controladores para obtener una respuesta más suave, pero ello afectaría a la rapidez con que se responde a las perturbaciones, que es la razón principal por la que se utiliza un control en cascada, además de que no es algo que realmente suponga un problema.

Pero la mayor diferencia entre ambos controladores se puede apreciar en el segundo ensayo: el rechazo a la perturbación VM3 que afecta al caudal impulsado es casi inmediato para el control en cascada, y el nivel se mantiene aún más cerca de la referencia antes de que el controlador reaccione.

Es conveniente mencionar que ambos controladores presentan un problema importante: la señal que se transmite a la válvula VR1 está cambiando continuamente debido a que ambos controladores siguen siendo muy agresivos. Esto no es tanto un inconveniente para el control del nivel LT, que se ha comprobado que es bastante bueno, como lo es para la válvula en sí, que va a sufrir un desgaste muy rápido si funciona continuamente con dichas oscilaciones.

Para solucionar esto, se deberían ajustar los controladores para que la señal de control sea menos agresiva, o al menos filtrar la señal que se envía a la válvula para que esta se mantenga lo más constante posible.

Con esto termina el estudio de la primera estrategia de control que se ha diseñado para la planta. A continuación, se da paso al estudio de la primera de las estrategias de control propuestas para la configuración 2 de la planta multiprocesos.

6 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PARA LA CONFIGURACIÓN 2 DE LA PLANTA

Como ya se pudo ver en la descripción general de la planta, en la configuración 2 de la misma se dispone de numerosos sensores que miden la temperatura del agua durante su recorrido a lo largo de la planta. Estos sensores están colocados principalmente antes y después de aquellos elementos que modifican la temperatura del agua activamente (es decir, las resistencias R1 y R2 y los dos intercambiadores de calor). No obstante, también hay otros sensores que están colocados en otros puntos de la planta:

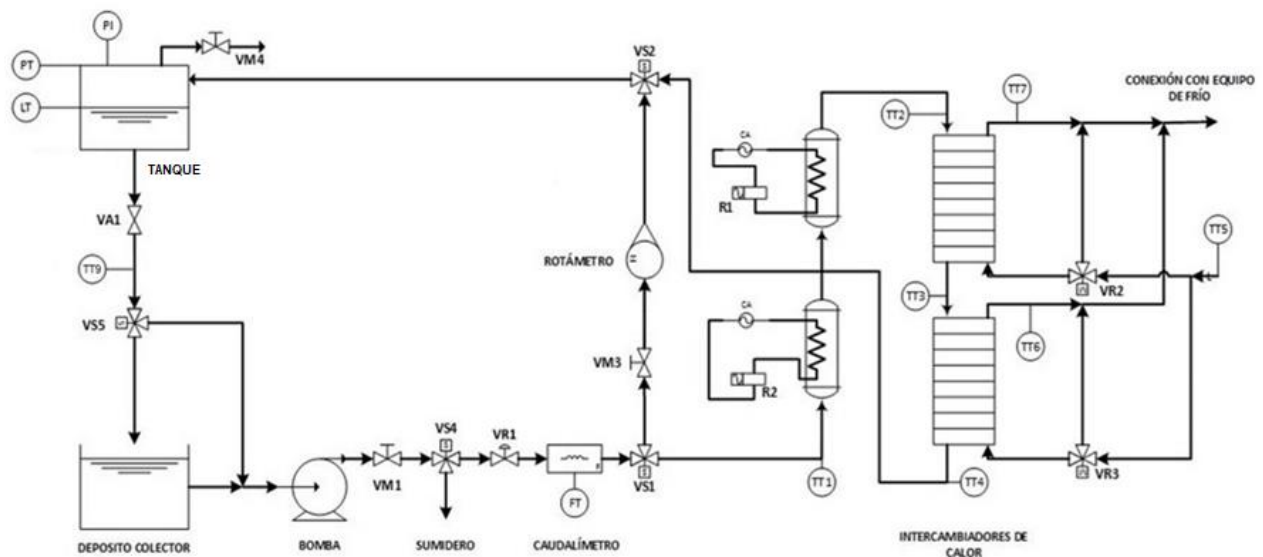


Figura 2.2 – Esquema de funcionamiento de la configuración 2 de la planta multiprocesos.

Para el control de dichas temperaturas se dispone de tres variables de actuación principales: R1 y R2, que permitirá calentar el agua que se impulsa desde el depósito, VR2 y VR3, que regulan la cantidad de agua fría que se introduce en los intercambiadores de calor colocados a continuación de las resistencias y que, por tanto, permiten enfriar el agua, y VR1, que permite regular el caudal de la planta, el cual va a afectar al funcionamiento de las resistencias y de los intercambiadores de calor.

Además, en esta configuración sigue siendo posible controlar el nivel del tanque contenedor de agua mediante la válvula VR1, como ya se había hecho antes en el apartado 5.

En base a esto, se han pensado dos estrategias de control distintas para la configuración 2:

- En primer lugar, un control predictivo de la temperatura TT9 mediante las válvulas VR2 y VR3 de los intercambiadores de calor, a la vez que se controlan el nivel LT del tanque mediante VR1 y la temperatura TT2 mediante las resistencias R1 y R2.

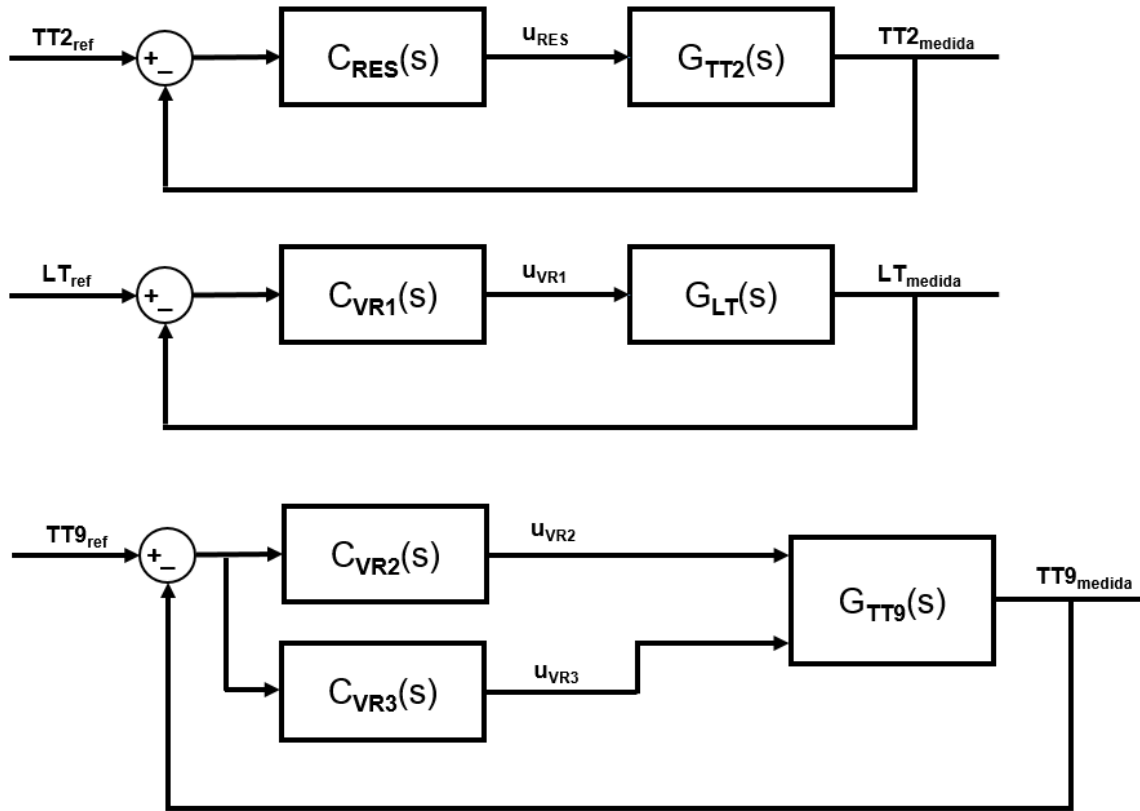


Figura 6.1 - Diagrama de bloques del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.

- Por otro lado, un control selectivo que permita controlar TT2 mediante R1 y R2 y también mediante la válvula VR1, siempre que el nivel del tanque no supere un valor determinado próximo al desbordamiento. Además, simultáneamente, se llevará a cabo el control de TT9 mediante VR2 y VR3, al igual que en la primera estrategia de control.

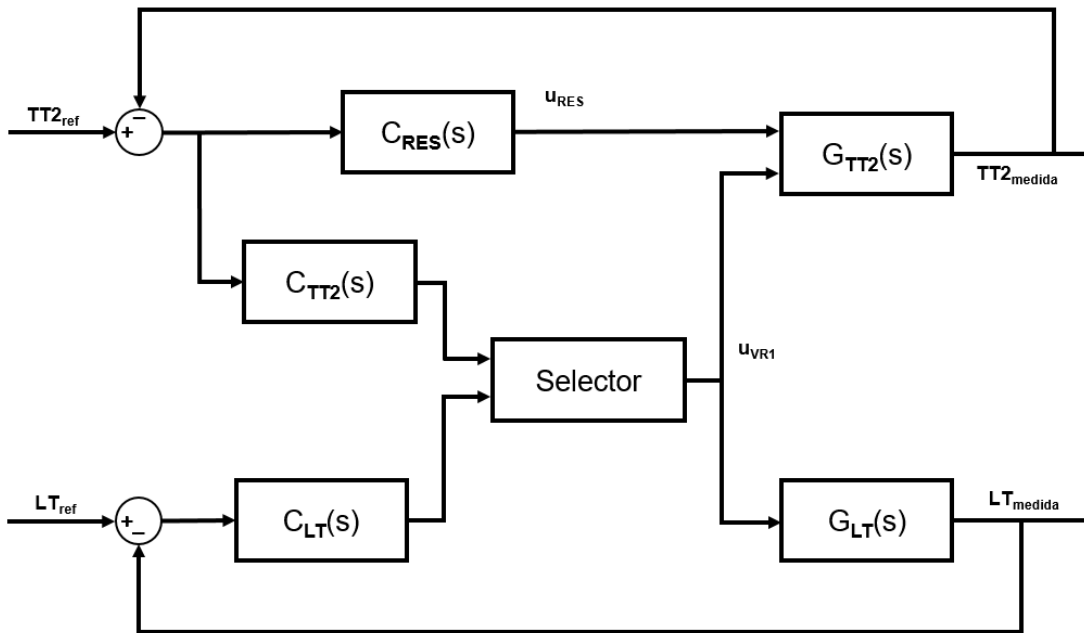


Figura 6.2 – Diagrama de bloques del control selectivo de TT2 y LT.

El razonamiento que se ha seguido para elegir controlar TT2 mediante las resistencias y TT9 mediante los intercambiadores de calor ha sido el siguiente: debido a que los intercambiadores de calor están colocados a continuación de TT2, la única forma que se tendría de controlar dicha temperatura sería modificando la temperatura del agua del depósito colector, lo cual no es factible ya que, en primer lugar, el proceso tiene una dinámica excesivamente lenta y, por otro, esto impediría controlar TT9 a la vez. Por tanto, la única opción (y la más lógica) para el control de TT2 es utilizar las dos resistencias, lo que deja el control de TT9 en manos de los intercambiadores de calor.

De esta forma, además, se tiene un sistema en el que los actuadores están acoplados entre sí: la acción en las resistencias va a afectar a TT2, pero también a TT9 de forma indirecta. Por otro lado, la acción de los intercambiadores de calor va a afectar (aunque con una dinámica muy lenta) a la temperatura TT2 del agua del depósito colector y, al fin y al cabo, también a TT2.

Es conveniente mencionar que, si se hubiera querido, se podría haber elegido controlar la temperatura TT4, que se mide justo a la salida del segundo intercambiador de calor, y que será muy parecida a la temperatura TT9, ya que no hay elementos que modifiquen activamente la temperatura del agua en el recorrido que separa ambos puntos de medida, salvo las pérdidas que se produzcan en el transporte.

No obstante, se ha elegido TT9 como variable a controlar precisamente por la distancia que existe entre la salida del segundo intercambiador de calor y el punto donde se mide la temperatura, que se traduce en un retraso importante ante la actuación en las válvulas de los intercambiadores de calor, y que hace que el control de dicha temperatura sea más difícil y, por tanto, más interesante de estudiar.

Una vez establecidas las estrategias de control pensadas para esta configuración de la planta, se pasa ahora a su diseño e implementación.

6.1. Control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3, TT2 mediante R1 y R2 y nivel LT mediante VR1

Como se acaba de mencionar, las temperaturas que se pretenden controlar son TT2, colocada entre las resistencias y la entrada al primer intercambiador de calor, y TT9, colocada a la salida del tanque de agua:

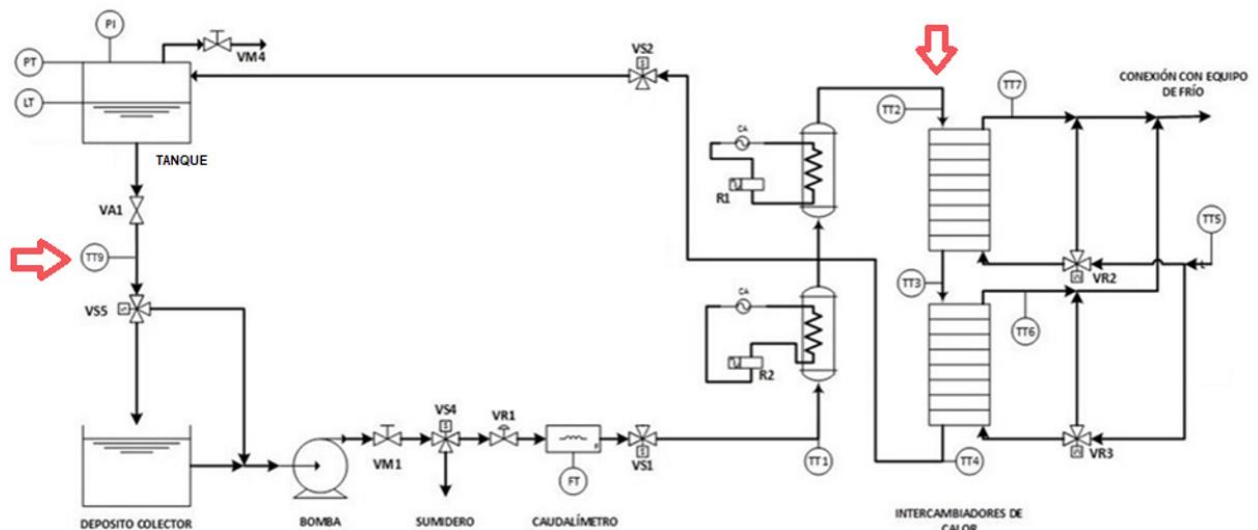


Figura 6.3 – Posición de los sensores de las temperaturas a controlar.

Por otro lado, en esta configuración se pretende utilizar también VR1 para el control del nivel LT, lo cual va a tener a su vez un efecto en ambas temperaturas. Para ello, se ha aprovechado el controlador PID simple diseñado en el apartado anterior. Si bien hubiera sido lógico utilizar el control en cascada, se ha optado por la opción más sencilla por ser suficientemente buena y con el fin de evitar crear un modelo de Matlab-Simulink demasiado complejo.

El desarrollo de la estrategia de control propuesta se ha dividido en las siguientes partes:

- 1) Diseño e implementación del controlador de TT2 mediante las resistencias R1 y R2.
- 2) Diseño e implementación del control predictivo mediante predictor de Smith de TT9 a través de VR2 y VR3 de los intercambiadores de calor.
- 3) Ensayo de la estrategia de control consistente en seguimiento de las referencias de TT2, TT9 y nivel LT, y respuesta ante perturbaciones.

A continuación, se da paso al apartado de diseño del controlador de la temperatura TT2.

6.1.1. Controlador PID simple de la temperatura TT2 mediante las resistencias R1 y R2

Para el control de la temperatura TT2 mediante las resistencias disponibles en la planta, es suficiente con diseñar un control simple PID, ya que no existe mucho retraso entre la acción en las resistencias y el cambio que esto produce en la temperatura TT2, y el control simple ha resultado suficientemente bueno.

Para la obtención de los parámetros del PID, se va a utilizar el mismo método utilizado hasta ahora, utilizar el método de ajuste de PID AMIGO para obtener los parámetros K , T_i y T_d del controlador a partir del modelo de primer orden que se ha obtenido para TT2 frente a las resistencias.

El modelo de primer orden obtenido durante la identificación estática de la planta fue el siguiente:

$$G(s) = \frac{0.0995}{25s + 1} e^{-17s}$$

Aplicando las ecuaciones del método AMIGO, los parámetros que se obtienen para el PID son los siguientes:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right) = 8.617$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8\tau}{L + 0.1\tau} L = 23.36$$

$$T_d = \frac{0.5L\tau}{0.3L + \tau} = 7.06$$

Para comprobar el funcionamiento del controlador, se ha sometido el sistema a un pequeño ensayo de seguimiento de referencias. Los resultados que se han obtenido han sido los siguientes:

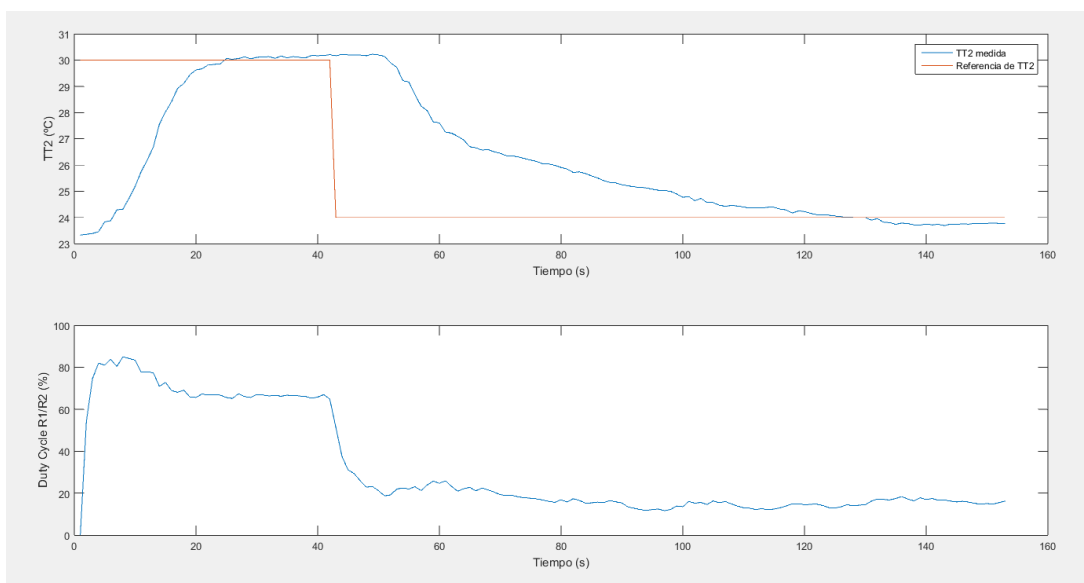


Figura 6.4 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador PID de TT2 mediante R1 y R2.

Como se puede comprobar, el controlador es capaz de seguir las referencias de TT2 sin problemas y prácticamente sin sobreoscilación.

A continuación, se pasa al diseño e implementación del control predictivo de TT9.

6.1.2. Control predictivo de TT9 mediante VR2 y VR3 mediante predictor de Smith

Contrariamente a lo que ocurría para el control de TT2, para el control de TT9 mediante las válvulas VR2 y VR3 se ha necesitado diseñar una estructura de control más compleja que permita hacer frente a los problemas que el retraso en la acción supone para el control de TT9. Por este motivo, se ha optado por utilizar una estructura de control predictivo mediante predictor de Smith.

El predictor de Smith [8] es una estructura de control diseñada para sistemas en los que existen retrasos importantes. Su principio de funcionamiento es el de, ante la imposibilidad de adelantar el sensor que proporciona la medida, estimar mediante un modelo del sistema (pero sin retraso), el valor que tendría la variable a medir.

No obstante, aunque el modelo del sistema se va a diseñar de manera en que se aproxime lo más posible al sistema real, no es posible conseguir un modelo perfecto del sistema y siempre va a haber discrepancias con el sistema real. Es por ello que, además de la estimación de la que proporciona el modelo, será necesario utilizar también medidas reales del sistema.

La forma que tiene el predictor de Smith de solventar este problema es el de comparar las medidas reales que se tienen en cada momento con el modelo que se ha diseñado, pero con el mismo retraso que el sistema real, y sumar el error que exista entre estas a la estimación del modelo sin retraso, siguiendo el siguiente esquema:

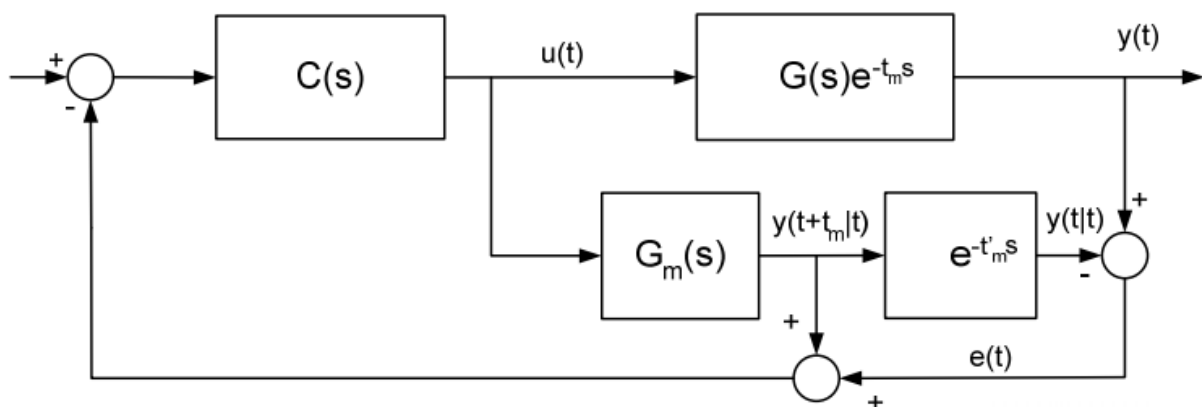


Figura 6.5 – Esquema de la estructura de un control predictivo mediante predictor de Smith.

De esta manera, cuando la estimación sea lo suficientemente buena, el error será aproximadamente cero y la medida realimentada será la del sistema sin retraso. Por otro lado, si existe un error entre la estimación y el sistema real, dicho error servirá para corregir la estimación sin retraso que se tiene.

Antes de comenzar a tratar el diseño del control predictivo en sí, es conveniente mencionar cuál va a ser la manera de utilizar las dos válvulas de regulación de los intercambiadores de calor. Existen diversas maneras de controlar la temperatura TT9 mediante VR2 y VR3, bien sea haciendo que ambas sean iguales o utilizando sólo una de las válvulas hasta que sature, momento en el que se empezará a controlar con la otra.

En este caso, se ha optado por utilizar VR2 desde un principio, manteniendo VR3 a 0 salvo que VR2 sature y sea necesaria la acción sobre VR3 para alcanzar la referencia marcada de TT9. Por otro lado, una vez que ya no sea necesaria la acción de VR3 para alcanzar la referencia, se volverá a anular la acción de VR3 cuando VR2 haya bajado hasta, al menos, a un 75%, para evitar que la válvula VR2 se vuelva a poner a cero en cuanto se alcance la referencia.

Teniendo esto en mente, va a ser necesario diseñar un controlador y un modelo para el predictor de Smith de

VR2 y de VR3 para cuando VR2 se encuentra saturada (que va a ser distinto al que se tendría para VR2=0).

El motivo por el cual se utiliza siempre VR2 y no VR3 es que existe un mayor retraso en la actuación de VR2 (como ya se pudo comprobar en la parte de identificación de la planta), lo cual hace el uso de un predictor de Smith aún más interesante.

Con esto, se pasa ahora al diseño de ambos controladores.

Diseño de los controladores predictivos de VR2 y VR3

Para el diseño de los controladores PID que forman parte de las estructuras de control predictivo que se pretenden implementar, se ha utilizado el mismo método utilizado hasta ahora de obtención de los parámetros del PID mediante el método AMIGO a partir de los modelos de primer orden que se han obtenido para cada actuador.

En cuanto a la válvula VR2, el modelo de primer orden que se obtuvo durante la identificación estática de la planta (y que será el modelo que se utilizará para la estimación realizada en el predictor de Smith) fue el siguiente:

$$G_{VR2}(s) = G_{PS}(s) = \frac{-0.256}{25s + 1} e^{-35s}$$

Que, al aplicar las ecuaciones del método AMIGO, proporcionan los siguientes parámetros del controlador PID:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right) = -2.037$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8\tau}{L + 0.1\tau} L = 31.73$$

$$T_d = \frac{0.5L\tau}{0.3L + \tau} = 12.32$$

No obstante, estos parámetros han resultado en un control relativamente lento, debido a que el punto de operación utilizado para la obtención del modelo de primer orden proporcionaba una ganancia relativamente grande a la que se obtiene para ensayos en temperaturas más bajas de TT9. Realizando algunos ajustes a los parámetros del PID para hacerlo más rápido, los parámetros finales que se han elegido han sido los siguientes:

$$K_p = -6$$

$$T_i = 20$$

$$T_d = 12$$

De igual manera, el modelo de primer orden que utilizado para la estimación del predictor de Smith también ha resultado no ser demasiado bueno, principalmente debido a su ganancia estática. Por ello, se ha modificado la ganancia estática del modelo en base al modelo que se obtuvo para VR3:

$$G_{PS}(s) = \frac{-0.1}{25s + 1} e^{-35s}$$

Por otro lado, si bien ya se obtuvo un modelo para VR3 también durante la identificación estática de la planta, el modelo que es de interés ahora es el que se obtiene para cuando VR2 = 100%. Realizando el mismo ensayo, pero con VR2 modificada, que tiene las siguientes condiciones de funcionamiento:

$$VR1 = 30\%, R1 = R2 = 75\%, VR2 = 100\%,$$

Y con un escalón que va del 0 al 50% del rango de VR3, los resultados obtenidos son los siguientes:

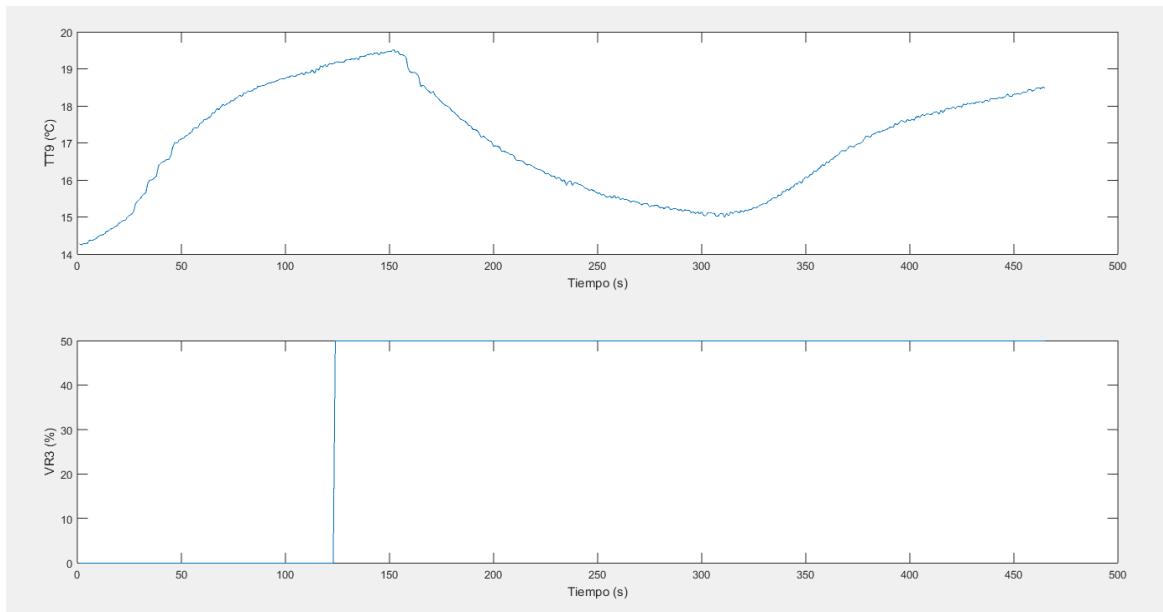


Figura 6.6 – Ensayo de escalón para modelo de primer orden de TT9 frente a VR3, con VR2 saturada.

A la hora de realizar este ensayo hay un inconveniente: cuando VR2 está saturada, incluso para valores altos de R1 y R2, la temperatura TT9 tiende a ser bastante baja, y por tanto se va a ver afectada en gran medida por las oscilaciones que tiene la temperatura TT5 del agua que proviene de la planta de frío. Este efecto se va intentar mitigar a continuación, pero antes se ha calculado un modelo de primer orden, aunque aproximado, a partir de estos resultados:

$$G_{VR3}(s) = \frac{-0.088}{52s + 1} e^{-28s}$$

Que será además el modelo de primer orden utilizado para la estimación del predictor de Smith.

Por último, volviendo a aplicar las ecuaciones del método AMIGO al nuevo modelo, se obtienen los siguientes parámetros para el controlador PID:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right) = -11.77$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8\tau}{L + 0.1\tau} L = 44.53$$

$$T_d = \frac{0.5L\tau}{0.3L + \tau} = 12.05$$

Una vez obtenidos los parámetros del controlador PID de VR3, se pasa ahora a intentar mitigar el efecto de las oscilaciones de TT5 en la temperatura TT9. Para ello, se ha incluido un elemento de feedforward que permite observar la oscilación en la temperatura TT5 y realimentarla directamente al sistema en forma de un cambio en la acción de control. Para poder calcular esta variación en la acción de control, se hace pasar la variación de TT5 con respecto a su punto medio (en este caso, se ha tomado como punto medio $TT5 \approx 8^\circ\text{C}$, como se podrá ver a continuación) por la función de transferencia que relaciona ambas, G_{ff} , que es la siguiente:

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_p(s)}{G_c(s)},$$

donde G_p es la función de transferencia de TT9 frente a la perturbación (TT5, en este caso), y G_c es la función de transferencia que relaciona TT9 con la variable de control (en este caso VR2, que será la única de las dos válvulas que se utilice para mitigar el efecto de las ondulaciones en la temperatura TT5).

Si bien ya se conoce la función de transferencia G_c , ya que es la que conforma el modelo de primer orden que se ha utilizado para el diseño del control por predictor de Smith de VR2, aún falta por conocer cuál es G_p . Para ello, se ha llevado el sistema a un punto de equilibrio un tiempo y se ha observado el efecto de las oscilaciones de TT5 en TT9:

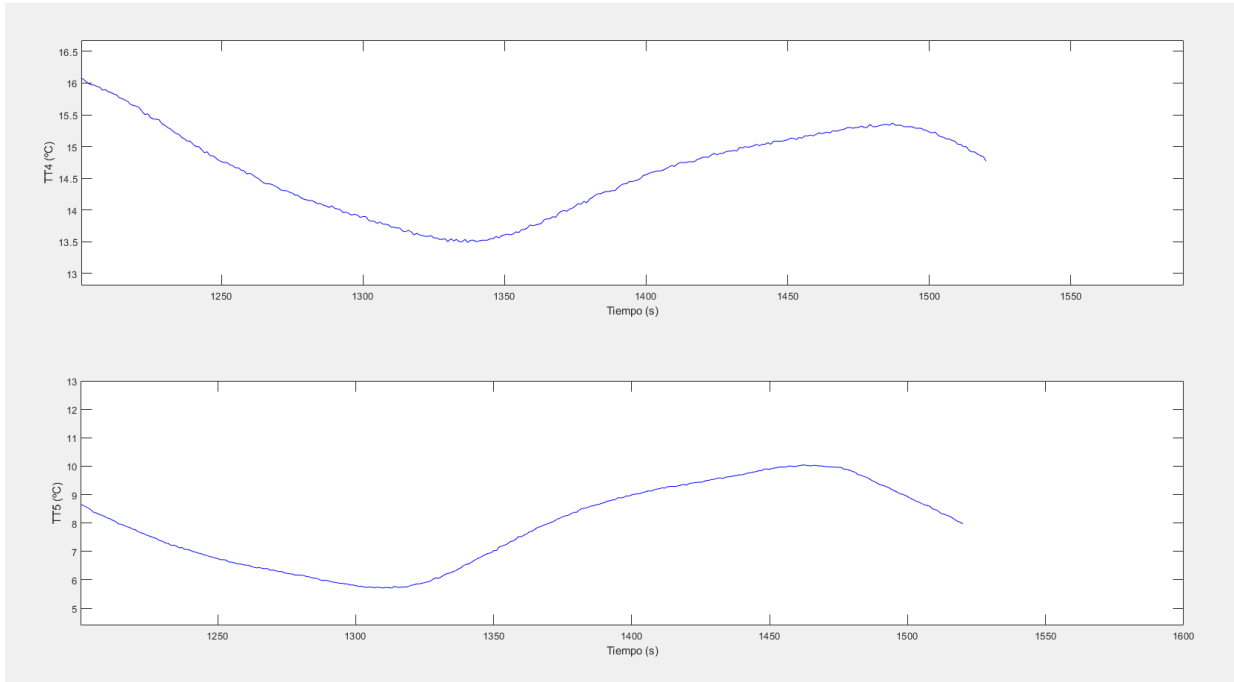


Figura 6.7 – Efecto de las oscilaciones de la temperatura TT5 en TT4.

Aquí se observa claramente el efecto que de TT5 sobre TT9, y además se pueden aprovechar los resultados obtenidos para obtener G_p . En este caso, por simplicidad, se ha optado por tomar como G_p (y G_c) únicamente la ganancia del sistema, de manera que:

$$G_p = \frac{(15.37 - 13.5)}{(10.04 - 5.67)} = 0.428$$

De esta forma, el término de feedforward que se sumará a la acción de control vendrá determinado por la siguiente función de transferencia:

$$G_{ff} = -\frac{G_p}{G_c} = \frac{0.428}{0.1} \approx 4.28$$

De esta manera, por cada 1 °C que suba la temperatura TT5 con respecto a la temperatura media de 8 °C, deberá aumentar en un 4.28% aproximadamente el valor de VR2 para poder contrarrestar su efecto sobre TT9.

Sin embargo, a la hora de implementar el feedforward de TT5 en el control de TT9, se ha comprobado que esto empeoraba el control más de lo que ayudaba. Esto es debido a que el acoplamiento de TT5 sobre TT9 es menor cuanto mayor es el valor de TT9, hasta el punto de que dichas oscilaciones llegan a ser casi inapreciables, por lo que el feedforward diseñado intenta compensar un efecto que no existe a temperaturas altas de TT9.

No obstante, es posible que, implementando de otra forma este elemento de feedforward (por ejemplo, haciendo que sólo este activo si lo está también VR3, o limitando su funcionamiento a valores bajos de la temperatura TT9), realmente pueda ayudar al control de TT9 mitigando el efecto de TT5. En este caso, se ha decidido no incluir elemento de feedforward en el control de TT9.

Con esto termina el diseño de las dos estructuras de control predictivo. Se pasa ahora a probar su funcionamiento antes de realizar el ensayo general junto al control de TT2.

Ensayo de funcionamiento del control predictivo de TT9 y mejoras propuestas

Con el fin de demostrar la eficacia del predictor de Smith a la hora de controlar TT9, se han sometido al mismo ensayo los controladores de VR2 y VR3 sin predictor de Smith y con él. El ensayo ha consistido en un simple seguimiento de referencias de TT9 en torno a su rango habitual de temperaturas de funcionamiento.

Los resultados que se han obtenido para el ensayo han sido los siguientes:

Control sin predictor

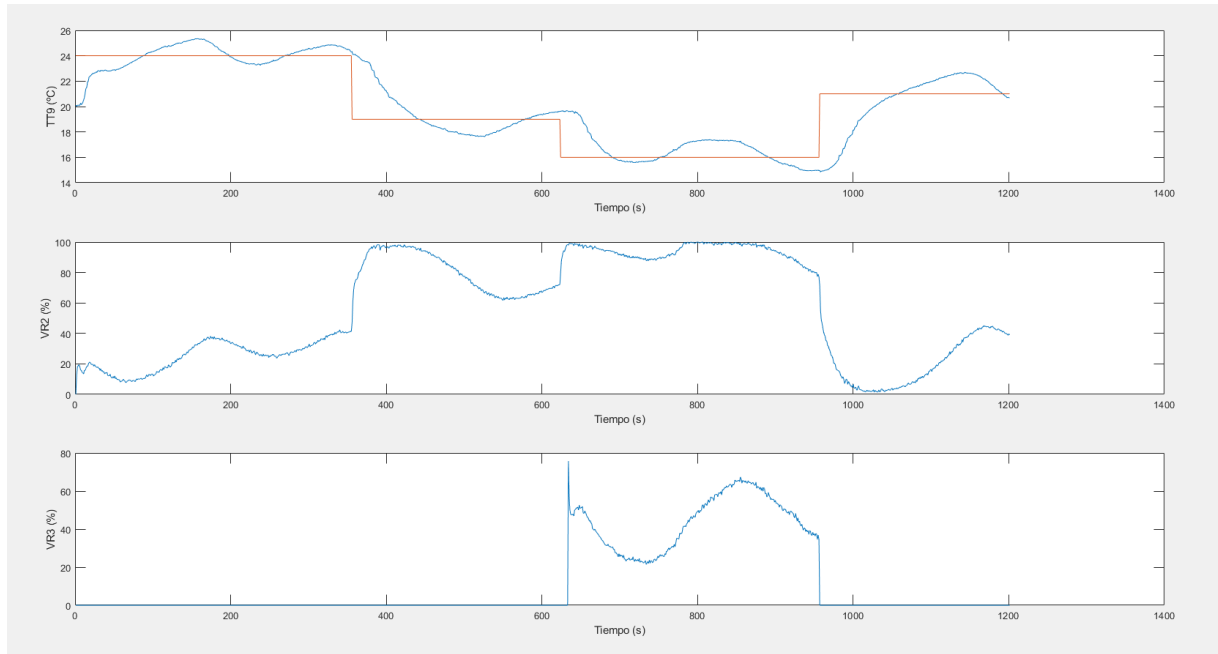


Figura 6.8 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 sin predictor.

Control con predictor de Smith

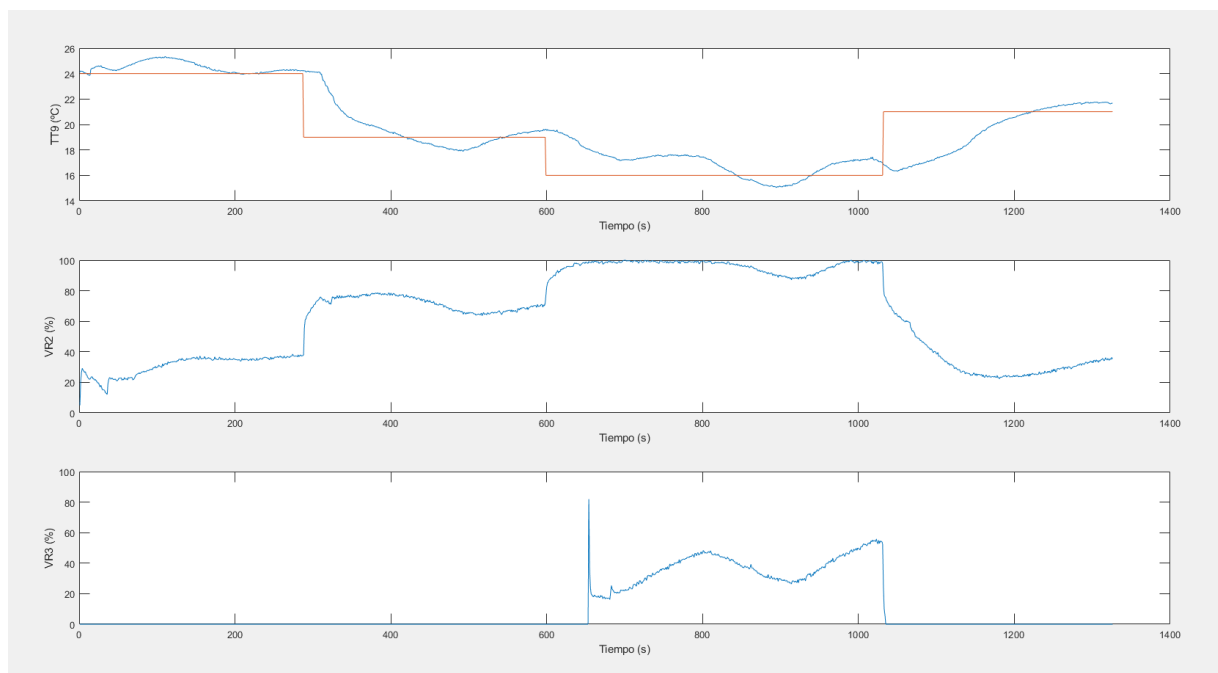


Figura 6.9 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 con predictor de Smith.

Observando la respuesta del control sin predictor, el controlador es capaz de seguir las referencias hasta cierto punto, aunque con grandes oscilaciones.

Por otro lado, la respuesta para el controlador con predictor de Smith presenta menos oscilaciones con respecto a la temperatura de referencia, menos sobreoscilaciones cuando se cambia la referencia de temperatura y, además, las señales de control son también bastante más suaves que para el control sin predictor de Smith.

No obstante, aunque la respuesta del control predictivo es mejor que la del control sin predictor, existen algunos problemas en el seguimiento de referencias, sigue presentando sobreoscilaciones importantes y en el escalón en el que está activa VR3, su funcionamiento llega a ser peor que el del control sin predictor. Además, aunque con el control predictivo se consiguen reducir las oscilaciones alrededor de la referencia de TT9.

Para intentar solventar estos problemas y, en general, conseguir un control predictivo más robusto, se ha propuesto añadir un filtro de predictor de Smith. Haciendo pasar el error que existe entre la estimación del predictor de Smith y la medida real, se consiguen atenuar las oscilaciones que se pueden dar en el control debido a las diferencias que existan entre el modelo utilizado para la estimación y el modelo real y sus respectivos retrasos. El esquema del controlador con filtro de predictor de Smith sería el siguiente:

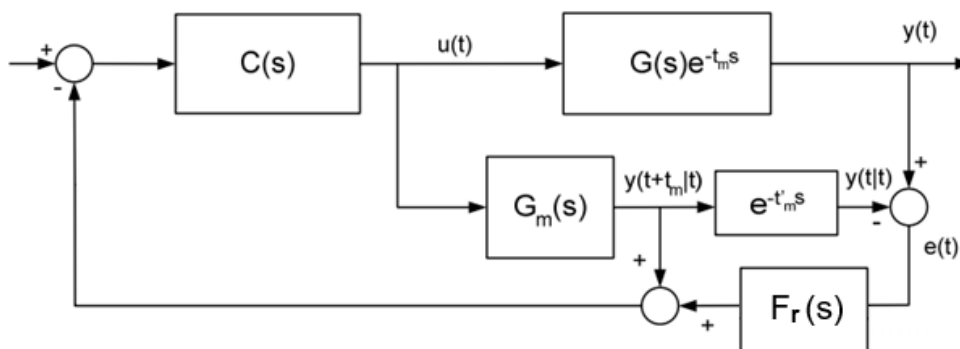


Figura 6.10 – Esquema de la estructura de un controlador con predictor de Smith filtrado.

El filtro de predictor de Smith es un filtro de paso bajo, con ganancia 1, cuya constante de tiempo es una fracción del retraso que se ha estimado para la planta (normalmente entre 0.1 y 0.5 veces el valor de dicho retraso). En este caso, se ha elegido una constante de tiempo igual a 0.1 veces el retraso que se ha calculado para la planta, de manera que el filtro del predictor de Smith estaría definido por la siguiente función de transferencia:

$$F_{rVR2}(s) = \frac{1}{\epsilon Ls + 1} = \frac{1}{0.2 * 35s + 1} = \frac{1}{7s + 1}$$

Además, para VR3 también se ha introducido un filtro en su predictor de Smith, que se obtiene de igual manera, aunque en este caso con $\epsilon = 0.1$, y que tiene la siguiente función de transferencia:

$$F_{rVR3}(s) = \frac{1}{\epsilon Ls + 1} = \frac{1}{0.1 * 28s + 1} = \frac{1}{2.8s + 1}$$

Con estos filtros, se conseguirá un control predictivo más robusto, con una atenuación de las oscilaciones debidas a los retrasos en la actuación. No obstante, debido a que el filtro afecta, al fin y al cabo, a las medidas reales que se obtienen de la planta, la respuesta a perturbaciones del predictor Smith filtrado será más lenta que la del controlador sin filtrar.

Volviendo a someter a la planta al mismo ensayo, ahora con el filtro de predictor de Smith, estos son los resultados que se obtienen:

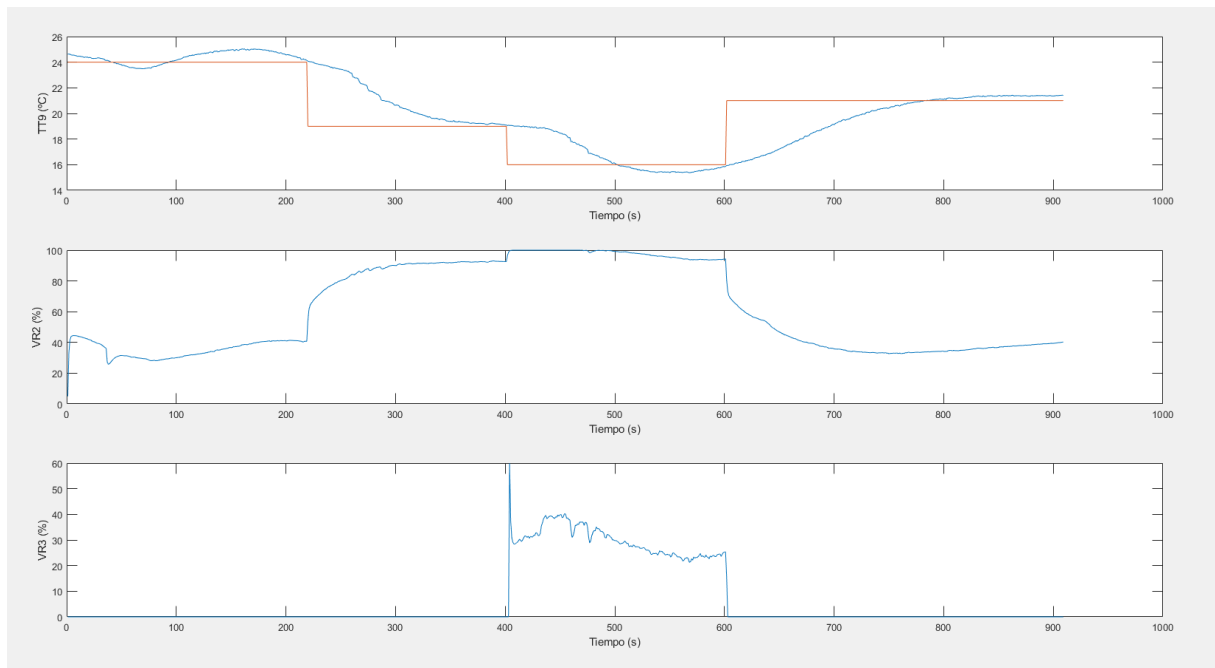


Figura 6.11 – Ensayo de seguimiento de referencias del controlador de TT9 con predictor de Smith filtrado.

Las mejoras son inmediatamente apreciables: el controlador se vuelve mucho más estable en las referencias que se marcan, incluso la más baja, de 16 °C, que mantiene la temperatura TT9 bastante próxima a la referencia cuando antes existían oscilaciones importantes. Además, la señal de controles también mucho más suave y se mantiene prácticamente constante una vez alcanzada la referencia, lo cual es importante en la acción sobre válvulas.

Este controlador con predictor de Smith filtrado será por tanto el que se utilizará para el control descentralizado de TT9, TT2 y LT. Con esto, se pasa ahora al ensayo de control de las tres variables mediante los controladores que se han descrito durante este apartado.

6.1.3. Ensayo del control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3, TT2 mediante las resistencias R1 y R2, y nivel LT mediante la válvula VR1.

El ensayo que se ha propuesto para probar el control descentralizado de TT2, TT9 y nivel del contenedor de agua ha sido el siguiente:

- En un primer momento, se fijan las siguientes referencias y parámetros:

$$TT9 = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad TT2 = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad VA1 = 2.75, \quad LT = 25 \text{ cm}$$

- Una vez alcanzadas las referencias de temperatura, se cambia la referencia de TT9 a 20 °C.
- Acto seguido, se cambia la referencia de nivel LT a 15 cm.
- A continuación, se cambia la referencia de TT9 a 25 °C y la de TT2 a 29 °C.
- Cuando se alcancen las referencias, se vuelve a cambiar TT2 a 27 °C.
- Una vez alcanzada la referencia, se cambia LT de nuevo a 25 cm.
- Después, se cambia la posición de la válvula VA1 a 2.4, y acto seguido se cambian las referencias de TT9 a 17 °C y la de TT2 a 24 °C.
- Una vez se hayan llevados las temperaturas a las referencias marcadas, se vuelve a cambiar VA1 a la posición 2.75.
- Por último, se vuelven a cambiar las referencias de temperatura: TT9 a 23 °C y TT2 a 29 °C. Cuando se alcancen las referencias, el ensayo se da por terminado.

Los cambios en la posición de la válvula VA1 se han introducido en el ensayo debido a que, regulando la velocidad a la que se descarga el tanque de agua, se modifica también la dinámica del sistema VR2-TT9, así como su retraso, afectando de gran manera al control de TT9.

Así, los resultados que se han obtenido al someter a la planta a dicho ensayo han sido los siguientes:

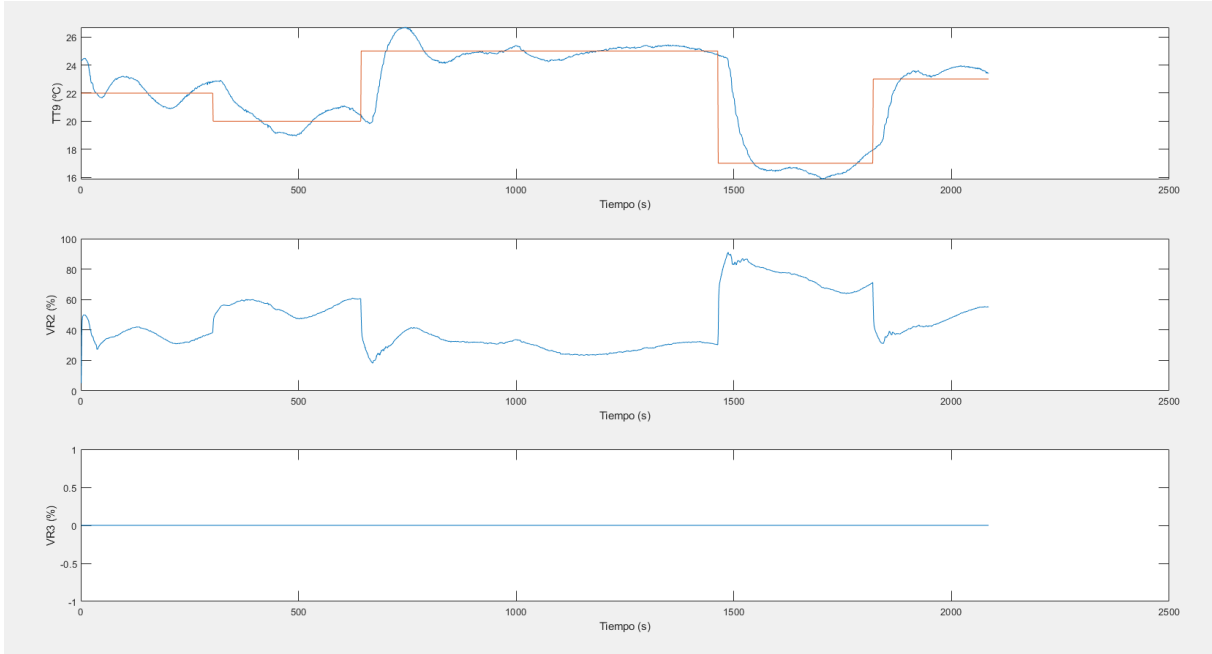


Figura 6.12 – Respuesta de TT9 en el ensayo general del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.

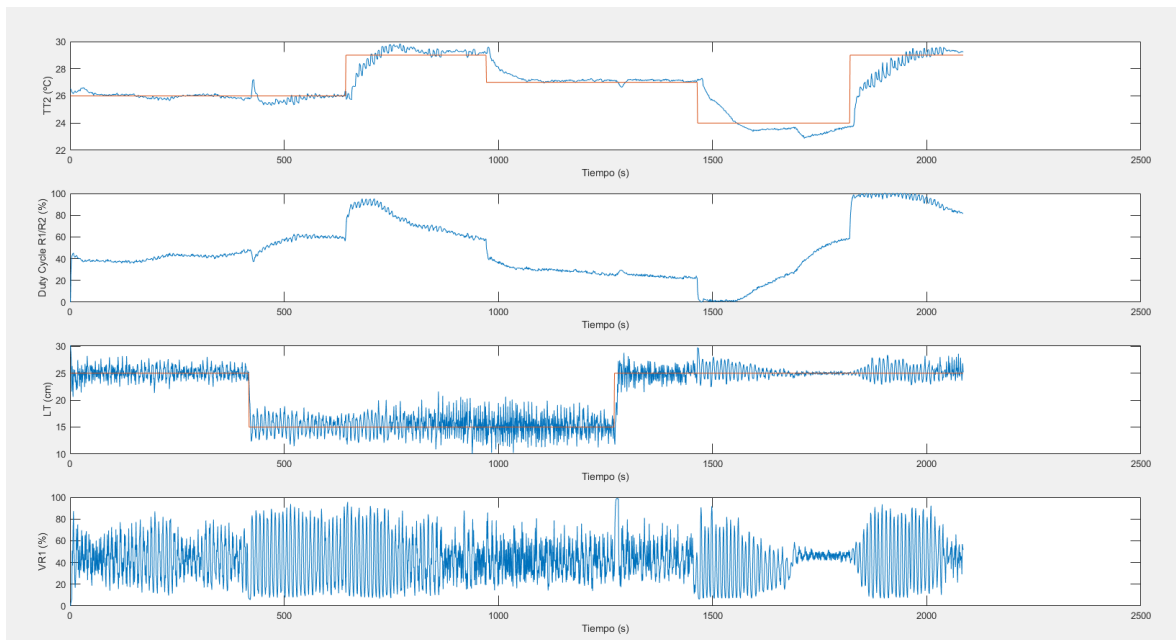


Figura 6.13 – Respuesta de TT2 y LT en el ensayo general del control descentralizado de TT2, TT9 y LT.

Como se puede observar, el control de TT9 sigue siendo bastante bueno, aunque con muchas más oscilaciones que las que se tenían en el ensayo aislado. Esto era de esperar, ya que ahora se está llevando a cabo el control descentralizado de tres variables, con actuadores que están acoplados entre sí.

Por otro lado, el control de TT2 es también bastante bueno, aunque en algunos momentos se pueden observar intervalos con mucho ruido que se deben al principal problema que se ha tenido en esta estrategia de control: en la configuración 2 de la planta, el ruido del sensor de nivel es mucho mayor que para la configuración 1. Además, debido a que las dinámicas de las temperaturas son tan lentas, se ha aumentado el período de muestreo con el que se lee el valor del sensor del servidor OPC de 0.1 (que se tenía durante el apartado anterior del control en cascada del nivel) a 0.5.

Con todo esto, además de que ya se partía de un control del nivel LT mediante VR1 bastante agresivo, se tiene una respuesta inaceptable en el control del nivel, donde además la válvula VR1 está abriéndose y cerrándose continuamente, lo cual acelera el desgaste de la válvula.

Para solventar este problema se proponen dos soluciones:

- En primer lugar, filtrar las lecturas que se tienen del sensor de nivel, de manera que la respuesta del controlador no sea tan drástica.
- Por otro lado, ajustar los parámetros del PID para que el control sea mucho más suave, lo cual, además de aliviar en gran parte el estrés al que se somete la válvula, ayudará también a que haya menos ruido en la temperatura TT2, que se ve afectada en gran parte por VR1.

No obstante, el objetivo principal de este ensayo era el de realizar el control descentralizado de TT9 y TT2, mientras que el control de nivel se ha propuesto como una forma de introducir una perturbación basada en un cambio de VR1 en el sistema, y el control que se ha conseguido para estas dos temperaturas ha sido bastante bueno. Por ello, se ha decidido no volver a entrar en el ajuste del controlador PID del nivel LT frente a VR1.

Con esto se da paso a la última estrategia de control que se ha diseñado para la planta, el control selectivo de TT2 mediante las resistencias R1 y R2 y la válvula VR1, y control de TT9 mediante VR2 y VR3.

6.2. Control selectivo de TT2 mediante R1 y R2 y VR1, con control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3

La estrategia de control que se ha diseñado en este apartado del trabajo se ha basado en parte en las estructuras de control que se han diseñado antes: el control de TT9 se realiza con el mismo control predictivo con predictor de Smith filtrado que se ha diseñado en el apartado anterior, y el controlador de TT2 mediante las resistencias R1 y R2 es también el mismo.

No obstante, se ha eliminado la necesidad de controlar el nivel del tanque contenedor de agua, pudiéndose utilizar también la válvula VR1, que regula el caudal de agua impulsado a través de la planta, para el control de TT2, con la única limitación de que no se supere un determinado nivel máximo de agua en el tanque.

Para ello, se ha implementado un control selectivo que detecte cuándo se supera dicho nivel máximo y limite el caudal VR1 a aquel que mantenga el nivel constante en el límite, de manera que, en el momento en el que el caudal necesario para alcanzar la referencia de TT2 sea menor que este caudal límite, se retome la acción de control que regula TT2.

Para el control de nivel, se ha utilizado el controlador PID simple que ya se utilizó en los apartados anteriores, mientras que, a continuación, se diseñará el controlador de TT2 mediante VR1. Posteriormente, se realizará un ensayo general de todo el conjunto de controladores para comprobar su funcionamiento en conjunto.

6.2.1. Diseño del controlador de TT2 mediante VR1 e implementación del control selectivo

De manera análoga a como ya se han obtenido los controladores PID en apartados anteriores del trabajo, para el cálculo de los parámetros del controlador PID de TT2 mediante VR1 se va a utilizar el modelo de primer orden obtenido durante la identificación de la planta que relaciona ambas variables. Dicho modelo era el siguiente:

$$G(s) = \frac{-0.331}{20s + 1} e^{-9s}$$

Utilizado en método AMIGO de ajuste empírico de controladores PID, los parámetros del controlador que se obtienen son los siguientes:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right) = -3.625$$

$$T_i = \frac{0.4L + 0.8\tau}{L + 0.1\tau} L = 1.781$$

$$T_d = \frac{0.5L\tau}{0.3L + \tau} = 4.5$$

No obstante, se ha decidido hacer que el controlador sea mucho más lento para en primer lugar, evitar cambios bruscos en la válvula VR1 y, por otro lado, porque VR1 se utiliza como una forma auxiliar de controlar TT2 con las resistencias, siendo la acción de las resistencias más efectiva en TT2 cuanto menor sea el caudal (y, por tanto, VR1). De esta forma, los parámetros finales que se han elegido para el controlador PID de TT2 mediante VR1 han sido:

$$K_p = -0.36$$

$$T_i = 2$$

$$T_d = 4$$

Por otro lado, para la implementación del control selectivo, se ha seguido un procedimiento bastante simple: en todo momento se comprueba si el nivel LT es menor que el máximo que se ha fijado, que es $LT = 35 \text{ cm}$. Si el nivel medido es menor que el máximo, VR1 vendrá definida por la acción del controlador TT2-VR1. Si el nivel medido es igual o mayor que el máximo, existen dos posibilidades:

- Si la acción del controlador TT2-VR1 es mayor que la del controlador LT-VR1, será la del control de nivel la que se tenga en cuenta.
- Si la acción del control TT2-VR1 pasa a ser menor que la del control LT-VR1, se volverá a utilizar VR1 para el control de TT2.

De esta manera, el nivel del tanque nunca superará el nivel máximo marcado, y en el momento en que la consigna de VR1 necesaria para llevar TT2 a la referencia sea menor que la que mantiene el nivel LT fijo en el máximo, se volverá a utilizar VR1 para ayudar en el control de dicha temperatura.

Con esto concluye la parte de diseño e implementación del control selectivo de TT2. A continuación, se mostrará el ensayo realizado sobre el conjunto de controladores para comprobar su funcionamiento simultáneo.

6.2.2. Ensayo del control selectivo de TT2 mediante R1, R2 y VR1, con control descentralizado de TT9 mediante VR2 y VR3

El ensayo que se ha propuesto realizar para el control selectivo ha sido bastante similar al realizado para la anterior estrategia de control, con la diferencia de que algunos de los cambios en las referencias que se han realizado son distintos. El ensayo en cuestión ha consistido en:

- En primer lugar, se fijan como **referencias TT9 = 22 °C, TT2 = 26 °C** y se lleva la válvula **VA1 a la posición 2.75**.
- Una vez alcanzadas las referencias iniciales, se cambia la referencia de **TT9 a 20 °C**.
- A continuación, se vuelven a cambiar las referencias: la referencia de **TT9 pasará a ser 23 °C y la de TT2, 29 °C**.
- Después, se vuelve a cambiar la referencia de **TT9 a 21 °C** y, a continuación, se cambia la **posición de VA1 a 2.2**.
- De nuevo, se cambian las referencias de **TT9 y TT2 a 19 °C y 23 °C, respectivamente**, tras lo que se vuelve a cambiar la posición de la válvula **VA1 a la posición 2.75**.
- Por último, se cambian las referencias de **TT9 a 23 °C y TT2 a 29 °C**. Con esto acaba el ensayo.

La respuesta de la planta al ensayo ha sido la siguiente:

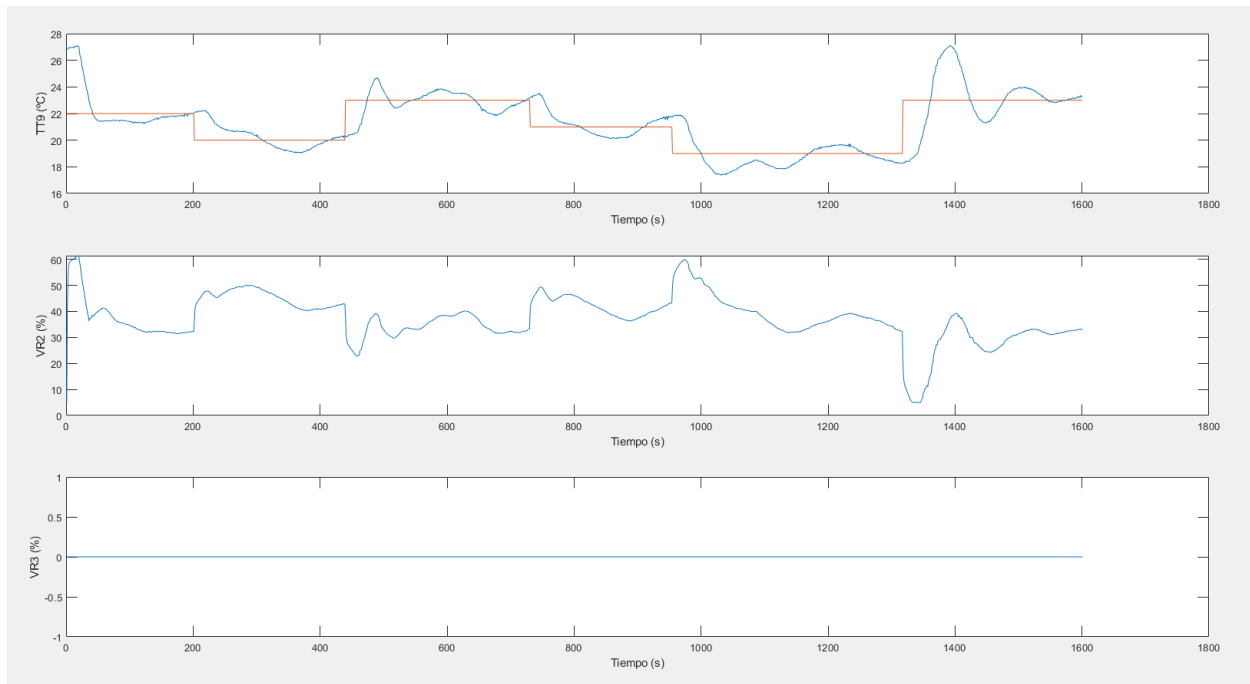


Figura 6.14 – Respuesta de TT9 en el ensayo general del control selectivo de TT2 y TT9.

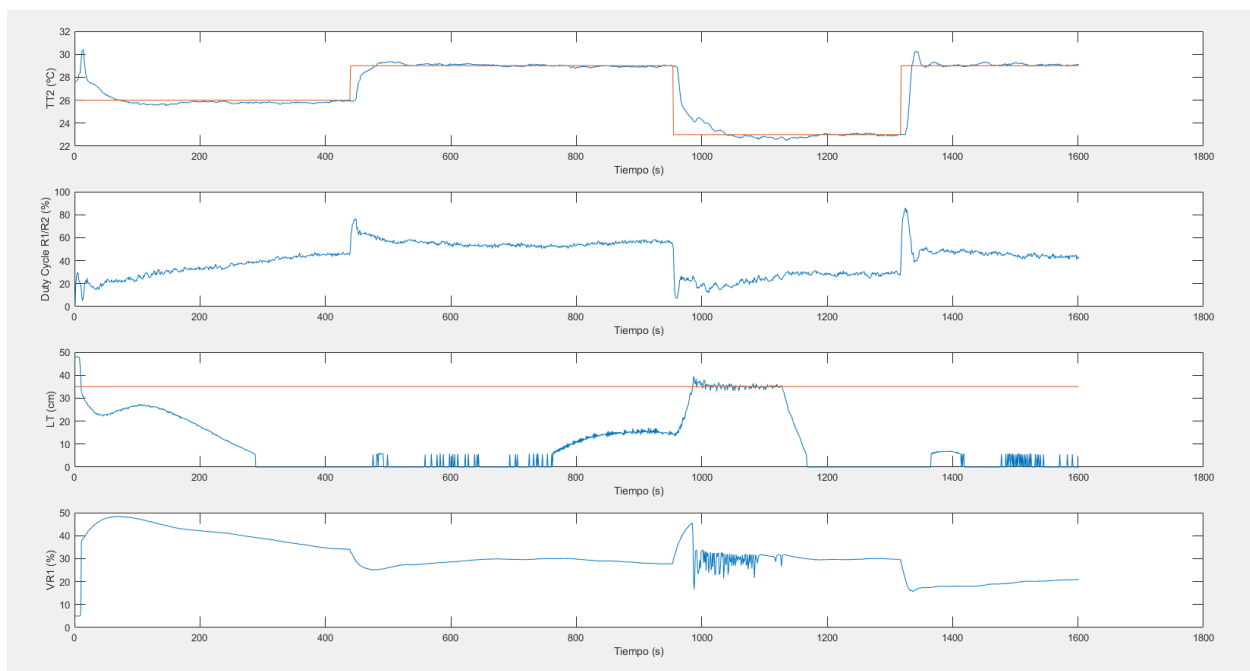


Figura 6.15 – Respuesta de TT2 y LT en el ensayo general del control selectivo de TT2 y TT9.

Lo primero que se observa es que la respuesta de TT9 en este caso es mucho peor a la que se tenía antes. Esto es debido principalmente a que, al introducir VR1 como variable que controla TT2, en los escalones en los que se varían simultáneamente las referencias de TT2 y TT9, el control de TT9 se ve afectado ya no sólo por la acción en las resistencias, sino también por la de VR1, que además tiene la particularidad de cambiar la dinámica de la acción de VR2 sobre TT9.

A esto además hay que sumarle el efecto de los cambios en la válvula VA1, que también van a modificar dicha dinámica. En retrospectiva, puede que el ensayo quizá haya sido demasiado desfavorable para el control de TT9. Aun así, el control ha sido relativamente bueno dadas las circunstancias.

Por otro lado, el control de TT2 ha mejorado mucho en comparación con el control anterior, en el que sólo se disponía de las resistencias para llevar dicha temperatura a su referencia. El control de TT2 es ahora bastante más rápido, con menos ruido y más estable en las referencias.

En cuanto al control selectivo, se puede observar que este funciona correctamente: en el intervalo de, aproximadamente, $t = 1000$ s hasta $t = 1170$ s, el caudal del controlador de TT2 mediante VR1 es mayor al caudal máximo que se puede introducir en el tanque para mantener el nivel fijo en $LT = 35$ cm, por lo que la acción de VR1 es limitada a la del controlador de nivel.

Una vez que se vuelve a cambiar la posición de la válvula VA1 para dejar que el depósito se descargue más rápidamente, el controlador TT2-VR1 vuelve a activarse, hasta que acaba el ensayo.

En algunos momentos del ensayo, se puede observar que el nivel del tanque varía entre los 5.5 cm, aproximadamente, y 0. Esto es debido a la zona muerta que existe en el sensor de nivel, como ya se comentó al principio de este trabajo. En esta zona muerta, el valor que proporciona el sensor de nivel en puntos es prácticamente constante hasta que alcanza los 5.5 cm de altura, a partir de lo cual ya se comporta de manera normal. La forma en que esto se ha intentado solucionar ha sido filtrar aquellos valores (en puntos) que se correspondan con alturas menos a 5.5 cm, y considerarlas como 0.

De esta manera, si la altura del agua en el tanque ronda dicha altura de 5.5 cm, como ha ocurrido en algunos momentos de este ensayo, esto se observa en la representación de nivel que se tiene como un cambio continuo de la señal entre 5.5 cm y 0.

Con esto termina el diseño e implementación de la última estrategia de control propuesta y con ello la tercera y última parte de este Trabajo de Fin de Grado.

7 CONCLUSIONES Y MEJORAS PROPUESTAS

7.1. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha realizado un estudio a fondo del funcionamiento de la planta multiprocesos en dos de sus configuraciones, tanto en materia de identificación de la planta como en diseño de controladores para la misma.

En primer lugar, se ha realizado una identificación del comportamiento estático de la planta, que ha permitido tener una idea inicial de cómo se comportan los distintos componentes de la planta y cómo era la respuesta de cada una de las variables medibles antes la acción de los distintos actuadores. Además, se ha realizado una caracterización de uno de los intercambiadores de calor en numerosos puntos de funcionamiento, con el objetivo de disponer de datos experimentales del mismo que puedan ser utilizados a posteriori en otros proyectos.

Por otro lado, se ha llevado a cabo un estudio de la respuesta frecuencial de cada una de las variables medibles que se han considerado más interesantes de estudio ante ensayos mediante señales chirp en cada uno de los actuadores de la planta. Además, a partir de estos resultados, se han obtenido modelos más complejos de cada uno de estos procesos.

Por último, se han diseñado distintas estrategias de control para cada una de las dos configuraciones de la planta con las que se ha trabajado en base a los resultados que se habían obtenido antes, y cada una de las cuales se ha pensado para solventar los distintos problemas que se pueden dar a la hora de controlar el funcionamiento de la planta.

7.2. Mejoras propuestas

Aunque el funcionamiento en general de la planta multiprocesos es bastante bueno, hay algunos componentes de la planta que podrían mejorarse.

En primer lugar, el sensor de nivel de agua del tanque es proclive a dar problemas, bien sea en temas de ruido del propio sensor, que a veces llegan al punto de hacer que sea imposible trabajar con el sensor y sin motivo aparente, y también por la tendencia del sensor a descalibrarse continuamente, haciendo que, cada vez que se quiera trabajar con el mismo, se deba recalibrar.

En base a esto, sería necesario investigar el motivo del mal funcionamiento del sensor y, en caso de ser imposible de arreglar, debería de sustituirse.

Por otro lado, la planta de frío ha dado también problemas. En ocasiones, la planta ha entrado en error, de nuevo sin motivo aparente, lo cual es especialmente molesto cuando se están realizando ensayos largos, haciendo que se pierda mucho tiempo debido a que la planta haya dejado de funcionar correctamente durante un ensayo.

Además, depende de cómo se mire, el hecho de que la temperatura del agua de la planta de frío oscile en torno a un punto en lugar de mantenerse fija, o al menos con unas oscilaciones de menor magnitud, puede ser contraproducente a la hora de controlar el resto de temperaturas de la planta, especialmente las que se miden a continuación de los intercambiadores de calor.

No obstante, esto también puede tomarse como una perturbación más que afecte a dichas temperaturas y que hagan más compleja la implementación de estrategias de control para el resto de temperaturas de la planta. Teniendo en cuenta que la planta se ha diseñado para fines educativos y de investigación, esto puede tomar como algo bueno en lugar de como un defecto.

8 REFERENCIAS

- [1] J. L. P. A. José Enrique Alonso Alfaya, *Planta Multiprocesos: Guía de Usuario*, Universidad de Sevilla, 2015.
- [2] J. M. R. Martínez, *Modelado, Identificación y Control de una Planta Piloto*, Proyecto Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2016.
- [3] J. E. A. Alfaya, *Desarrollo e implementación del sistema de control de una planta multiprocesos*, Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Sevilla, 2013.
- [4] J. L. P. Acosta, *Rediseño de la planta multiprocesos y mejora del sistema de control*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2015.
- [5] «Asignatura: Fundamentos de Control,» 2º Curso del Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2015.
- [6] «Asignatura: Control de Procesos Industriales,» 4º Curso del Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2017.
- [7] K. J. Åström y T. Hägglun, «Revisiting the Ziegler-Nichols Tuning Rules for PI Control,» *Asian Journal of Control*, 2002.
- [8] J. N. Rico, *Control of Dead-Time Processes*, 2007.
- [9] «Asignatura: Laboratorio de Control de Procesos,» 4º Curso del Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2017.
- [10] K. J. Åström y T. Hägglund, *Control PID Avanzado*, 2009.